

Sveučilište u Zagrebu
Fakultet elektrotehnike i računarstva
Zavod za visoki napon i energetiku

ELEKTRIČNA POSTROJENJA

Auditorne vježbe

Studen, 2007.

Električna postrojenja

© 2007 – FER ZVNE.

Izdanje studeni 2007

Nastavnici:

prof. dr. sc. Slavko Krajcar

dr. sc. Marko Delimar

Suradnici:

dr. sc. Minea Skok

Ivan Rajšl

Luka Lugarić

Ovaj “radni materijal” predstavlja kratki zapis dijela gradiva i zadataka koji se obrađuju u sklopu predmeta *Električna postrojenja* po nastavnom programu FER 2. Dio gradiva obuhvaćen je samo zadacima, a dio i malim objašnjenjem ili analizom.

Preporučena literatura:

1. Predavanja, S.Krajcar, M. Delimar, www.fer.hr/predmet/elepos, 2007
2. Visokonaponska rasklopna postrojenja, H. Požar, Tehnička knjiga, Zagreb, 1990
3. Electric Power Substations Engineering, J.D. McDonald, CRC Press, 2003
4. Introduction to Electric Power Systems, <http://ocw.mit.edu/index.html>, MIT OpenCourseWare, 2005
5. Power System Analysis, J. Grainger, W. Stevenson, McGraw-Hill, 1994

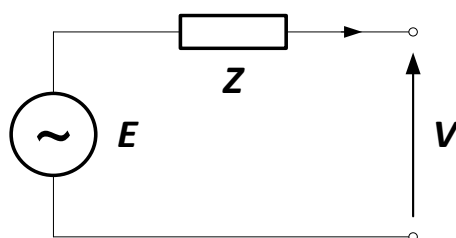


1. Simetrični trofazni sustav

Velika većina elektroenergetskih sustava zasnovana je na izmjeničnim trofaznim sustavima. Generatori su građeni tako da su inducirane elektromotorne sile (naponi) svih triju faza po iznosu jednake i međusobno kutno pomaknute za 120° . S druge strane, u normalnom pogonu su i opterećenja svih triju faza jednaka, osim u iznimnim slučajevima kao što su velika industrijska postrojenja sa elektrolučnim pećima (jednofazno trošilo) te napajanje željeznice (dvofazno trošilo). Kao posljedica jednakih impedancija u sve tri faze te jednakih elektromotornih sila, u sve tri faze teku jednake struje po iznosu te međusobno kutno pomaknute za 120° .

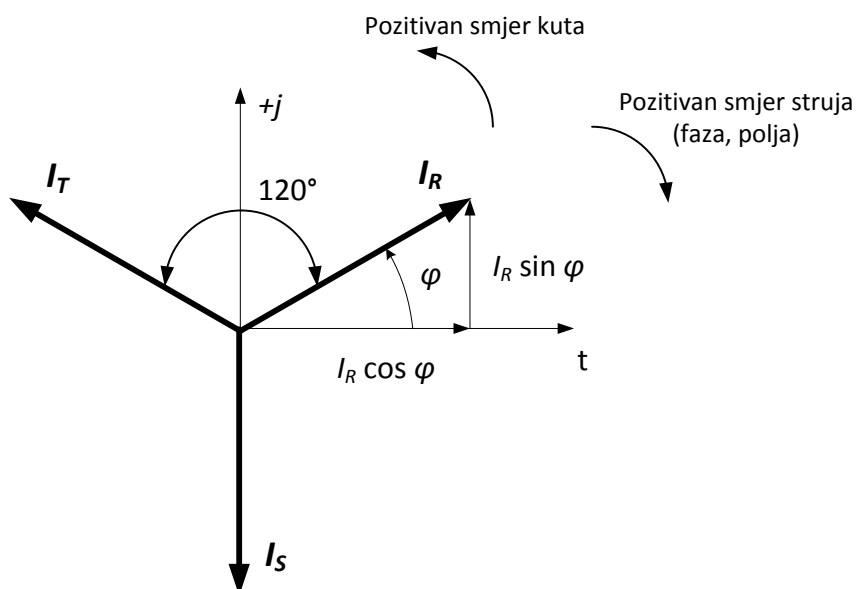
Stoga možemo prilikom proračuna prilika (napona, struja ...) u trofaznoj mreži u normalnom pogonu proračune napraviti samo za jednu fazu, a onda po završenom proračunu možemo, uz odgovarajući fazni pomak (120° , 240°), prilike prenijeti u ostale faze.

Proračun prilika u trofaznom se sustavu, kod normalnih pogonskih prilika, provodi na sljedećoj ekvivalentnoj jednofaznoj shemi trofaznog simetričnog sustava (Slika 1).



Slika 1

Prikažimo sada vektorski strujne prilike u takvom jednom simetričnom trofaznom sustavu - Slika 2. Pri crtanju dijagrama najprije se crtaju struje, potom i osi kompleksne ravnine te komponente struje faze R u toj ravnini).



Slika 2

Trenutna vrijednost struje u fazi R je prema vektorsko-fazorskom dijagramu:

$$i_R = I_R \cdot \sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi),$$

gdje φ označava položaj vektora I_R u trenutku $t = 0$ (trenutna vrijednost struje faze R u trenutku $t = 0$), gdje je I_R efektivna vrijednost struje u fazi R. Uvažavajući fazne i kutne pomake struja u fazama S i T spram struje u fazi R, vrijedi za trenutne vrijednosti struja u fazama S i T:

$$i_S = I_S \cdot \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{4\pi}{3}\right) = I_S \cdot \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \varphi - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$i_T = I_T \cdot \sqrt{2} \sin\left(\omega t + \varphi + \frac{2\pi}{3}\right)$$

Kako su efektivne vrijednosti struja u sve tri faze jednake vrijedi da je $I_R = I_S = I_T = I$.

Kako sinusnu funkciju $\sqrt{2} \sin(\omega t + \varphi)$ možemo u kompleksnoj ravnini prikazati vektorom modula I i argumenta ψ , to onda za struje prikazane u toj kompleksnoj ravnini možemo pisati:

$$I_R = I(\cos\psi + j\sin\psi), \text{ uz } \psi = \omega t + \varphi$$

$$I_S = I\left(\cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right)\right)$$

$$I_T = I\left(\cos\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right) + j\sin\left(\psi + \frac{2\pi}{3}\right)\right) = I\left(\cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) + j\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right)\right)$$

Odnosno, u skladu s Eulerovim izrazom, iste izraze možemo pisati i na slijedeći način:

$$I_R = I \cdot e^{j\psi} = I \left| \psi \right.$$

$$I_S = I \cdot e^{j\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right)} = I \left| \psi - \frac{2\pi}{3} \right.$$

$$I_T = I \cdot e^{j\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right)} = I \left| \psi - \frac{4\pi}{3} \right.$$

Sada uvodimo operator " α " sa značenjem:

$$\alpha = 1 \left| \frac{2\pi}{3} \right. = e^{j\frac{2\pi}{3}} = \cos\frac{2\pi}{3} + j\sin\frac{2\pi}{3} = -0,5 + j0,866$$

Množenje s operatorom \mathbf{a} znači zakretanje vektora za kut $2\pi/3$ odnosno 120° , u pozitivnom smislu. Vrijednosti potencija operatora \mathbf{a} su:

$$\mathbf{a}^2 = \left(e^{j\frac{2\pi}{3}} \right)^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -0,5 - j0,866$$

$$\mathbf{a}^3 = \left(e^{j\frac{2\pi}{3}} \right)^3 = e^{j2\pi} = 1$$

$$\mathbf{a}^4 = \left(e^{j\frac{2\pi}{3}} \right)^4 = e^{j\frac{2\pi}{3}} \cdot \left(e^{j\frac{2\pi}{3}} \right)^3 = 1 \cdot e^{j\frac{2\pi}{3}} = \mathbf{a}$$

$$\mathbf{a}^5 = \mathbf{a}^2$$

$$\mathbf{a}^6 = 1$$

$$\mathbf{a}^7 = \mathbf{a}$$

$$\mathbf{a}^8 = \mathbf{a}^2$$

...

Općenito zapisano vrijedi:

$$1 = \mathbf{a}^0 = \mathbf{a}^3 = \mathbf{a}^6 = \dots = \mathbf{a}^{3n}$$

$$\mathbf{a} = \mathbf{a}^4 = \mathbf{a}^7 = \dots = \mathbf{a}^{(3n+1)}$$

$$\mathbf{a}^2 = \mathbf{a}^5 = \mathbf{a}^8 = \dots = \mathbf{a}^{(3n+2)}, \quad n = 0, 1, 2, 3 \dots$$

Prema tome, možemo sada pisati izraze za struje:

$$I_R = I e^{j\psi}$$

$$I_S = \mathbf{a}^2 I e^{j\psi} = \mathbf{a}^2 I_R$$

$$I_T = \mathbf{a} \cdot I e^{j\psi} = \mathbf{a} \cdot I_R$$

Ili, napisano u matričnom obliku:

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{a}^2 & 0 \\ 0 & 0 & \mathbf{a} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_R \\ I_R \\ I_R \end{bmatrix}$$

Kao što je poznato, zbog **simetričnosti** prilika u trofaznom sustavu vrijedi:

$$I_R + I_S + I_T = 0$$

Navedenu relaciju možemo pokazati da vrijedi i nakon što smo uveli nove oznake za struje:

$$I_R + I_S + I_T = I_R(1 + \mathbf{a}^2 + \mathbf{a}) = I_R \cdot 0 = 0$$

2. Nesimetrični trofazni sustav

Za nesimetrične trofazne sustave vrijedi da struje (naponi) nisu međusobno jednaki po iznosu ili kutu ili oboje. Uzroci tome mogu biti slijedeći:

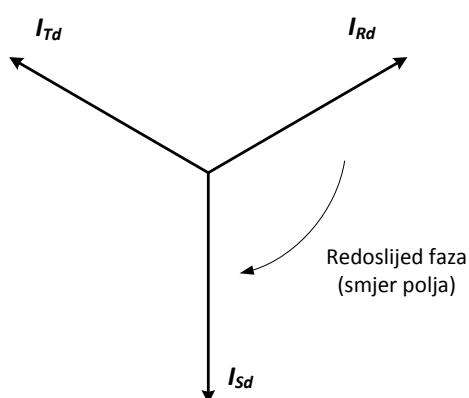
1. nesimetrično opterećenje (elektrolučne peći, željeznica),
2. kvarovi u mreži osim trofaznog kratkog spoja (K3),
3. nejednake elektromotorne sile po pojedinim fazama (pogreška u građenju generatora).

Pri tomu je važno napomenuti da se ovaj zadnji slučaj vrlo rijetko javlja, tako da su najčešći uzroci nesimetrija u trofaznom sustavu nesimetrična opterećenja i kvarovi u mreži.

Naravno, budući da prilike u svim fazama nisu usporedive, nije više moguće prilike u mreži promatrati kroz prilike u samo jednoj fazi. Kada bi se prilike u ovakvom nesimetričnom sustavu promatrale za svaku fazu posebno te se čak koristile i poznate metode čvorova, petlje, superpozicije i slično, proračun bi bio dugačak. Zbog vrlo jednostavnog proračunavanja prilika u mreži kada su prilike simetrične, želja je na neki način rastaviti ovakav nesimetričan trofazni sustav u 3 simetrična trofazna sustava. Tako je nastala metoda simetričnih komponenti.

Prema metodi simetričnih komponenti moguće je svaki nesimetričan sustav rastaviti na tri simetrična sustava koji se redom nazivaju direktni, inverzni i nulti sustav. Odnosno, 3 kakva god vektora međusobno različita po fazi ili kutu (struje, napona) koji prezentiraju prilike u nekom dijelu nesimetričnog sustava, moguće je zamijeniti sa 3 sustava od po 3 vektora, od kojih svaki predstavlja komponentu originalnog vektora. Međusobno zbrojene komponente vektora u direktnom, inverznom i nultom sustavu daju originalan vektor. Pri tome vrijedi za vektore jednog od tih simetričnih sustava da su sve komponente jednake po iznosu i međusobno fazno pomaknute za jedan kut (kako uostalom i treba vrijediti za jedan simetričan trofazan sustav.

Direktni sustav (oznaka: d, 1)

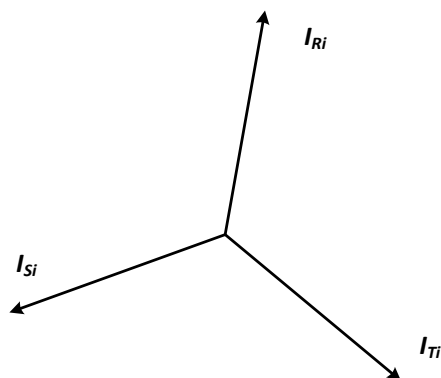


$$\begin{aligned} I_{Rd} &= I_d \\ I_{Sd} &= a^2 I_{Rd} = a^2 I_d \\ I_{Td} &= a \cdot I_{Rd} = a \cdot I_d \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} I_{Rd} \\ I_{Sd} \\ I_{Td} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a^2 & 0 \\ 0 & 0 & a \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_d \\ I_d \end{bmatrix}$$

Dogovor: Dogovorno je uzeto da kada se piše I_d onda se misli na komponentu vektora struje faze R u direktnom sustavu, dok se ostale komponente vektora struje faze S i T dobivaju množenjem I_d sa a^2 , odnosno a .

Inverzni sustav (oznaka: i, 2)



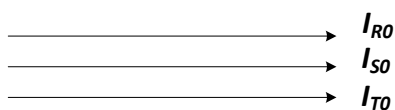
$$I_{Ri} = I_i$$

$$I_{Si} = a \cdot I_{Ri} = a \cdot I_i$$

$$I_{Ti} = a^2 \cdot I_{Ri} = a^2 \cdot I_i$$

$$\begin{bmatrix} I_{Ri} \\ I_{Si} \\ I_{Ti} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & a & 0 \\ 0 & 0 & a^2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_i \\ I_i \\ I_i \end{bmatrix}$$

Nulti sustav (oznaka: o, 0)



$$I_{RO} = I_o$$

$$I_{SO} = I_o$$

$$I_{TO} = I_o$$

$$\begin{bmatrix} I_{RO} \\ I_{SO} \\ I_{TO} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_o \\ I_o \\ I_o \end{bmatrix}$$

Zbrajanjem tri komponente struje jedne faze, u direktnom, inverznom i nultom sustavu dobivamo stvarnu veličinu struje u jednoj fazi:

$$I_R = I_{Rd} + I_{Ri} + I_{RO} = I_d + I_i + I_o$$

$$I_S = I_{Sd} + I_{Si} + I_{SO} = a^2 \cdot I_d + a \cdot I_i + I_o$$

$$I_T = I_{Td} + I_{Ti} + I_{TO} = a \cdot I_d + a^2 \cdot I_i + I_o$$

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ a^2 & a & 1 \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_o \end{bmatrix}$$

Ako se relacije međusobno kombiniraju, moguće je iz stvarnih vektora struja dobiti komponente vektora struje faze R, u direktnom, inverznom i nultom sustavu – time, naravno, dalje i komponente struja ostale dvije faze S i T.

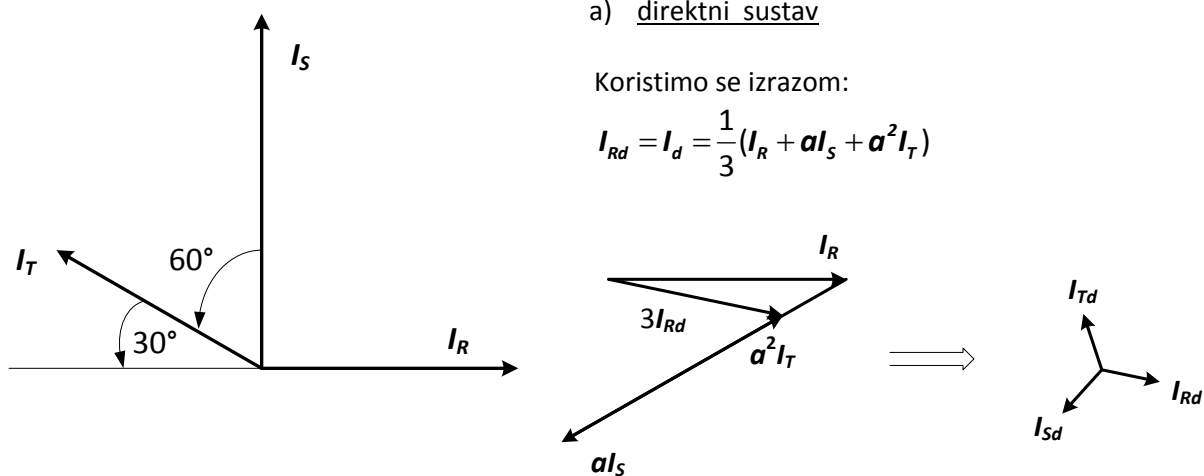
$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_o \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix}$$

Primjer: Geometrijsko određivanje simetričnih komponenti nesimetričnog sustava vektora (struja, napona).

a) direktni sustav

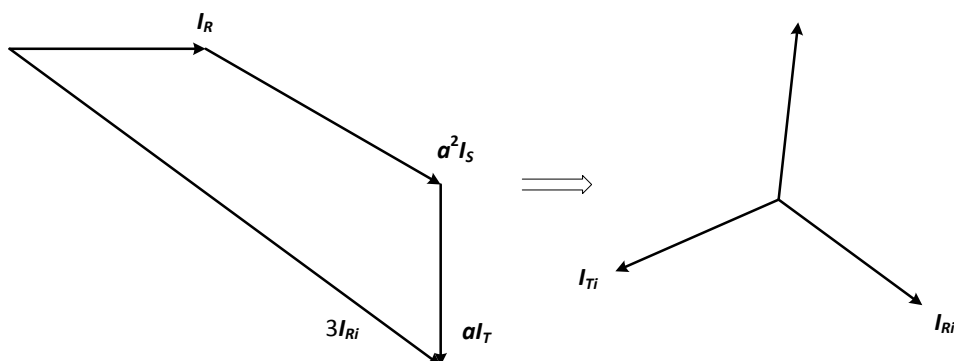
Koristimo se izrazom:

$$I_{Rd} = I_d = \frac{1}{3}(I_R + aI_S + a^2I_T)$$



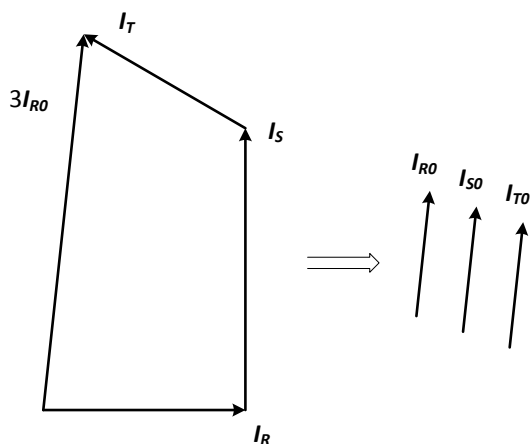
b) inverzni sustav

Koristimo se izrazom: $I_{Ri} = I_i = \frac{1}{3}(I_R + a^2I_S + aI_T)$



c) nulti sustav

Koristimo se izrazom $I_{R0} = I_0 = \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T)$



1. Primjer – Grafički i analitički rastavite nesimetrični sustav napona

$$V_R = 6 \angle 90^\circ \text{ kV}$$

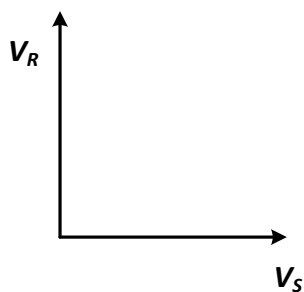
$$V_S = 6 \angle 0^\circ \text{ kV}$$

$$V_T = 0 \text{ kV}$$

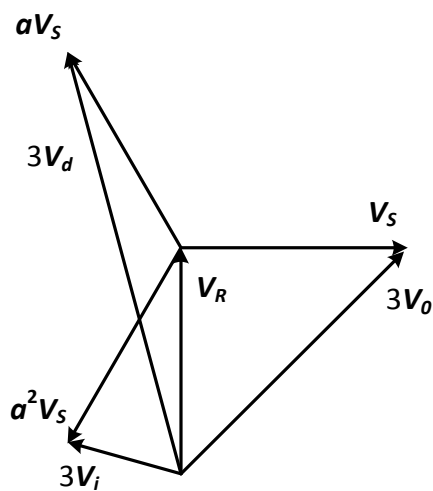
na simetrične komponente.

Rješenje:

a) grafički

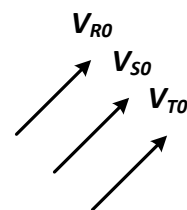
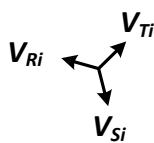
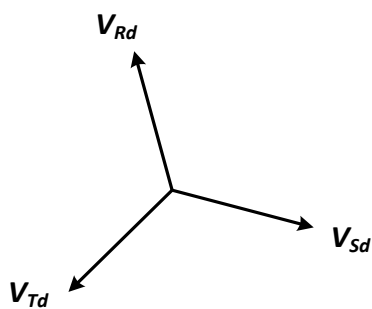


direktni sustav



inverzni sustav

nulti sustav



b) analitički

$$\mathbf{V}_d = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + \mathbf{a} \cdot \mathbf{V}_S + \mathbf{a}^2 \cdot \mathbf{V}_T) = \frac{1}{3}(6\angle 90^\circ + 1\angle 120^\circ \cdot 6\angle 0^\circ + 1\angle 240^\circ \cdot 0)$$

$$= 2 \cdot (\cos 90^\circ + j \sin 90^\circ + \cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) =$$

$$= 2 \cdot (1j - 0,5 + j0,866) = -1 + j3,732 = 3,86\angle 105^\circ \text{ kV}$$

$$\mathbf{V}_{Rd} = \mathbf{V}_d = 3,86\angle 105^\circ \text{ kV}$$

$$\mathbf{V}_{Sd} = \mathbf{a}^2 \cdot \mathbf{V}_d = 1\angle 240^\circ \cdot 3,86\angle 105^\circ = 3,86\angle 345^\circ \text{ kV} = 3,86\angle -15^\circ \text{ kV}$$

$$\mathbf{V}_{Td} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{V}_d = 1\angle 120^\circ \cdot 3,86\angle 105^\circ = 3,86\angle 225^\circ \text{ kV} = 3,86\angle -135^\circ \text{ kV}$$

$$\mathbf{V}_i = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + \mathbf{a}^2 \mathbf{V}_S + \mathbf{a} \mathbf{V}_T) = \frac{1}{3}(6\angle 90^\circ + 1\angle 240^\circ \cdot 6\angle 0^\circ) = 1,035\angle 165^\circ \text{ kV}$$

$$\mathbf{V}_{Ri} = \mathbf{V}_i = 1,035\angle 165^\circ \text{ kV}$$

$$\mathbf{V}_{Si} = \mathbf{a} \cdot \mathbf{V}_i = 1,035\angle 285^\circ \text{ kV} = 1,035\angle -75^\circ \text{ kV}$$

$$\mathbf{V}_{Ti} = \mathbf{a}^2 \cdot \mathbf{V}_i = 1,035\angle 45^\circ \text{ kV}$$

$$\mathbf{V}_0 = \frac{1}{3}(\mathbf{V}_R + \mathbf{V}_S + \mathbf{V}_T) = \frac{1}{3}(6\angle 90^\circ + 6\angle 0^\circ) = 2,828\angle 45^\circ \text{ kV}$$

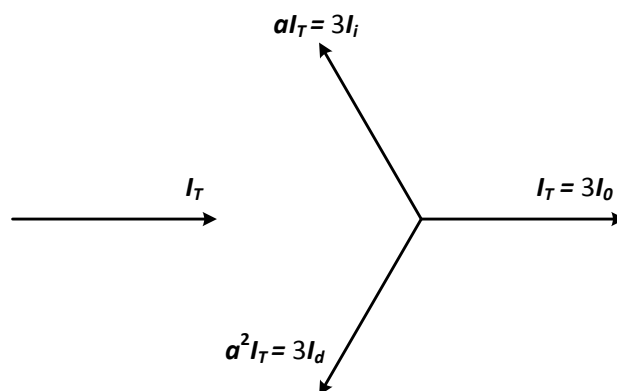
$$\mathbf{V}_{R0} = \mathbf{V}_{S0} = \mathbf{V}_{T0} = \mathbf{V}_0 = 2,828\angle 45^\circ \text{ kV}$$

2. Primjer – Odredite grafički i analitički direktni, inverzni i nulti sustav faznih struja za jednofazno opterećenje priključeno na fazu T, $\mathbf{I}_T = 60\angle 0^\circ \text{ A}$ na simetrične komponente.

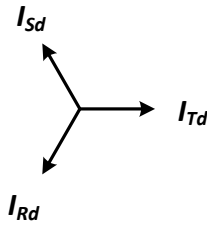
Rješenje:

Jednofazno opterećenje priključeno na fazu T, $\mathbf{I}_T = 60\angle 0^\circ \text{ A} \Rightarrow \mathbf{I}_R = \mathbf{I}_S = 0 \text{ A}$.

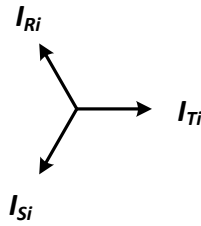
a) grafički



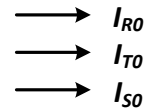
direktni sustav



inverzni sustav



nulti sustav



b) analitički

$$I_d = \frac{1}{3}(I_R + \alpha \cdot I_S + \alpha^2 \cdot I_T) = \frac{1}{3}(1 \angle 240^\circ \cdot 60 \angle 0^\circ) = 20 \angle 240^\circ \text{ A}$$

$$= 20(\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) = 20 \left(-0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) =$$

$$= -10 - j10\sqrt{3} \text{ A}$$

$$I_{Rd} = I_d = -10 - j10\sqrt{3} \text{ A}$$

$$I_{Sd} = \alpha^2 \cdot I_d = 1 \angle 240^\circ \cdot 20 \angle 240^\circ = 20 \angle 120^\circ = 20(\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = -10 + j10\sqrt{3} \text{ A}$$

$$I_{Td} = \alpha \cdot I_d = 1 \angle 120^\circ \cdot 20 \angle 240^\circ = 20 \angle 0^\circ = 20(\cos 0^\circ + j \sin 0^\circ) = 20 \text{ A}$$

$$I_i = \frac{1}{3}(I_R + \alpha^2 I_S + \alpha I_T) = \frac{1}{3}(1 \angle 120^\circ \cdot 60 \angle 0^\circ) = 20 \angle 120^\circ = 20(\cos 120^\circ + j \sin 120^\circ) = -10 + j10\sqrt{3} \text{ A}$$

$$I_{Ri} = I_i = -10 + j10\sqrt{3} \text{ A}$$

$$I_{Si} = \alpha \cdot I_i = 1 \angle 120^\circ \cdot 20 \angle 120^\circ = 20 \angle 240^\circ = 20(\cos 240^\circ + j \sin 240^\circ) = -10 - j10\sqrt{3} \text{ A}$$

$$I_{Ti} = \alpha^2 \cdot I_i = 1 \angle 240^\circ \cdot 20 \angle 120^\circ = 20 \angle 360^\circ = 20 \angle 0^\circ = 20 \text{ A}$$

$$I_o = \frac{1}{3}(I_R + I_S + I_T) = \frac{1}{3} 60 \angle 0^\circ = 20 \text{ A}$$

$$I_{Ro} = I_{So} = I_{To} = I_o = 20 \text{ A}$$

Sad je još moguće provjeriti da se doista zbrajanjem direktne, inverzne i nulte komponente struja dobivaju same struje:

$$I_{Rd} + I_{Ri} + I_{Ro} = -10 - j10\sqrt{3} - 10 + j10\sqrt{3} + 20 = 0 \text{ A} = I_R$$

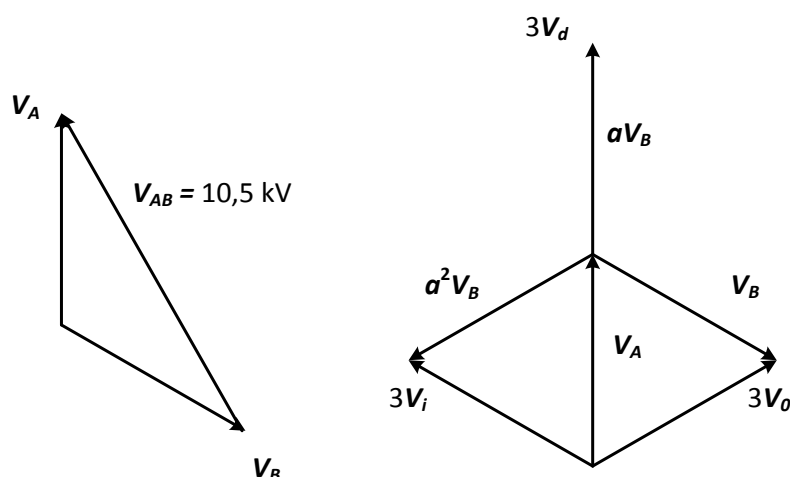
$$I_{Sd} + I_{Si} + I_{So} = -10 + j10\sqrt{3} - 10 - j10\sqrt{3} + 20 = 0 \text{ A} = I_S$$

$$I_{Td} + I_{Ti} + I_{To} = 20 + 20 + 20 = 60 \text{ A} = I_T$$

3. Primjer – Odredite grafički i analitički direktni, inverzni i nulti sustav faznih napona na stezaljkama trofaznog generatora koji nije priključen na mrežu, a kod kojeg je došlo do prekida namota faze C s odgovarajućom stezaljkom generatora. Između druge dvije stezaljke izmjeren je napon 10,5 kV.

Rješenje:

a) grafički



direktni sustav: "d"

inverzni sustav: "i"

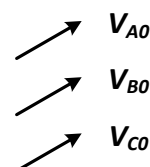
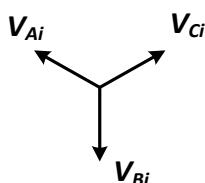
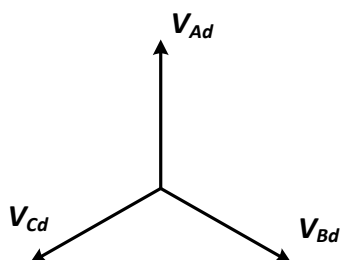
Relacije koje se koriste:

$$V_d = \frac{1}{3}(V_A + aV_B)$$

$$V_i = \frac{1}{3}(V_A + a^2V_B)$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_A + V_B)$$

nulti sustav: "0"



b) analitički

$$|V_{AB}| = 10,5 \text{ kV} \Rightarrow |V_A| = |V_B| = 6,06 \text{ kV}$$

$$V_A = 6,06 \angle 90^\circ = j6,06 \text{ kV} \Rightarrow \text{za odabrani vektorski prikaz napona}$$

$$V_B = 6,06 \angle -30^\circ = 6,06(0,866 - j0,5) = 5,25 - j3,03 \text{ kV}$$

$$V_C = 0 \text{ kV}$$

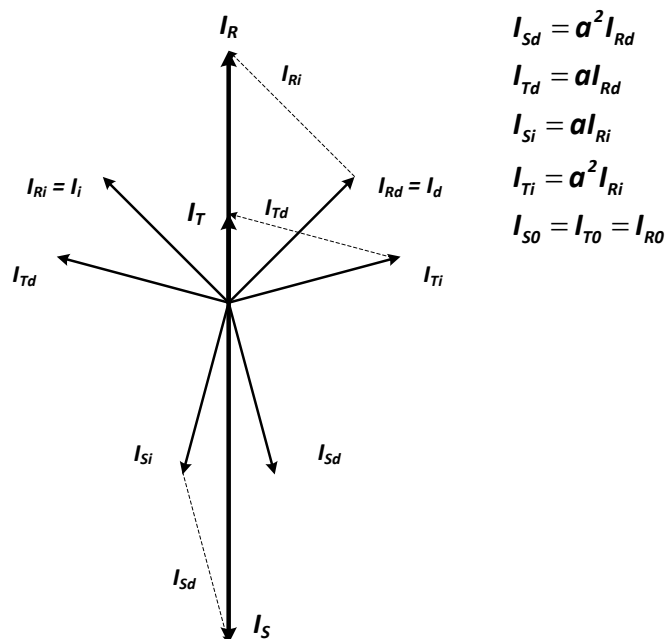
$$\begin{aligned}
 V_{Ad} = V_d &= \frac{1}{3}(V_A + \alpha \cdot V_B + \alpha^2 \cdot V_C) = \frac{1}{3}(6,06 \angle 90^\circ + 6,06 \angle -30^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ) = \\
 &= \frac{1}{3}(6,06 \angle 90^\circ + 6,06 \angle 90^\circ) = j4,04 = 4,04 \angle 90^\circ \text{ kV} \\
 V_{Bd} &= \alpha^2 \cdot V_d = 1 \angle 240^\circ \cdot 4,04 \angle 90^\circ = 4,04 \angle 330^\circ = 4,04 \angle -30^\circ \text{ kV} \\
 V_{Cd} &= \alpha \cdot V_d = 1 \angle 120^\circ \cdot 4,04 \angle 90^\circ = 4,04 \angle 210^\circ = 4,04 \angle -150^\circ \text{ kV} \\
 V_{Ai} = V_i &= \frac{1}{3}(V_A + \alpha^2 \cdot V_B + \alpha \cdot V_C) = \frac{1}{3}(6,06 \angle 90^\circ + 6,06 \angle -30^\circ \cdot 1 \angle 240^\circ) = \\
 &= \frac{1}{3}(6,06 \angle 90^\circ + 6,06 \angle 210^\circ) = 2,02(j - 0,866 - j0,5) = 2,02(-0,866 + j0,5) = 2,02 \angle 150^\circ \text{ kV} \\
 V_{Bi} &= \alpha V_i = 1 \angle 120^\circ \cdot 2,02 \angle 150^\circ = 2,02 \angle 270^\circ = 2,02 \angle -90^\circ \text{ kV} \\
 V_{Ci} &= \alpha^2 V_i = 1 \angle 240^\circ \cdot 2,02 \angle 150^\circ = 2,02 \angle 390^\circ = 2,02 \angle 30^\circ \text{ kV} \\
 V_{Ao} = V_{Bo} = V_{Co} = V_o &= \frac{1}{3}(V_A + V_B + V_C) = \frac{1}{3}(6,06 \angle 90^\circ + 6,06 \angle -30^\circ) = \\
 &= 2,02(j + 0,866 - j0,5) = 2,02(0,866 + j0,5) = 2,02 \angle 30^\circ \text{ kV}
 \end{aligned}$$

4. Primjer – Nađite analitički i grafički struje u fazama za slijedeći slučaj nesimetrije:

$$\begin{aligned}
 I_{Rd} &= 10 \angle 45^\circ \text{ A} \\
 I_{Ri} &= 10 \angle 135^\circ \text{ A} \\
 I_{Ro} &= 0 \text{ A}
 \end{aligned}$$

Rješenje:

a) grafički



b) analitički

$$I_R = I_{Rd} + I_{Ri} + I_{Ro} = 10 \angle 45^\circ + 10 \angle 135^\circ = 10 \left(\frac{\sqrt{2}}{2} + j \frac{\sqrt{2}}{2} - \frac{\sqrt{2}}{2} + j \frac{\sqrt{2}}{2} \right) = 10\sqrt{2} \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$I_R = 14,14 \angle 90^\circ \text{ A}$$

$$I_S = I_{Sd} + I_{Si} + I_{So} = a^2 \cdot I_{Rd} + a \cdot I_{Ri} + I_{Ro} = 1 \angle 240^\circ \cdot 10 \angle 45^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 10 \angle 135^\circ = \\ = 10(0,2588 - j0,9659 - 0,2588 - j0,9659) = -j \cdot 19,32 = 19,32 \angle -90^\circ \text{ A}$$

$$I_T = I_{Td} + I_{Ti} + I_{To} = a \cdot I_{Rd} + a^2 \cdot I_{Ri} + I_{Ro} = 1 \angle 120^\circ \cdot 10 \angle 45^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 10 \angle 135^\circ = \\ = 10(-0,9659 + j0,2588 + 0,9659 + j0,2588) = j5,176 = 5,176 \angle 90^\circ \text{ A}$$

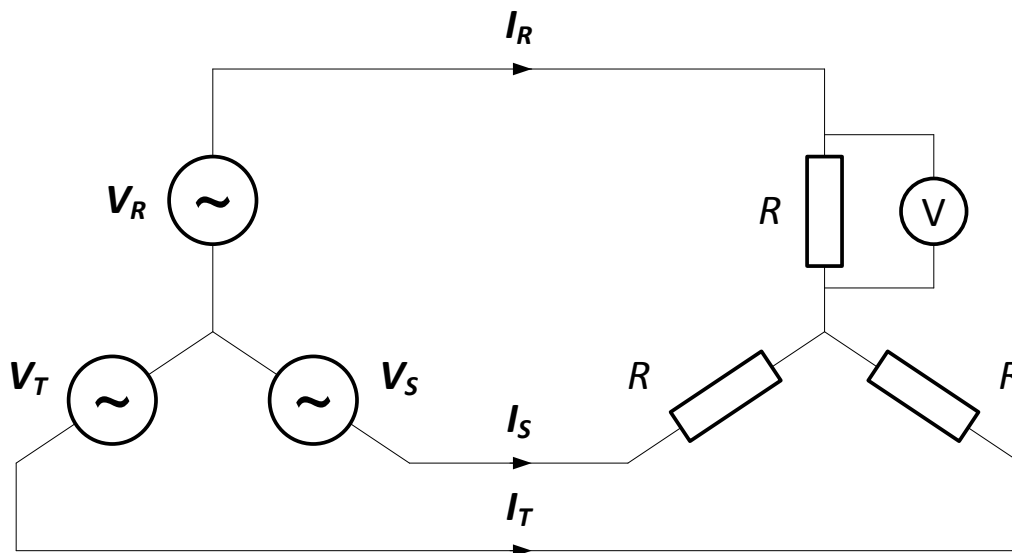
5. Primjer – Na trofazni idealni (zanemarive unutrašnje impedancije) nesimetrični sustav izvora napona, spojen u zvijezdu, priključena su tri jednaka voltmetra, također spojena u zvijezdu. Unutrašnji otpori voltmetra iznose $10 \text{ M}\Omega$ (reaktancija se zanemaruje). Fazni naponi izvora su

$$V_R = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_S = 200 \angle 270^\circ \text{ V}$$

$$V_T = 100 \angle 120^\circ \text{ V}$$

Koristeći metodu simetričnih komponenti, odrediti analitički prikazivanje voltmetra priključenog na fazu R.

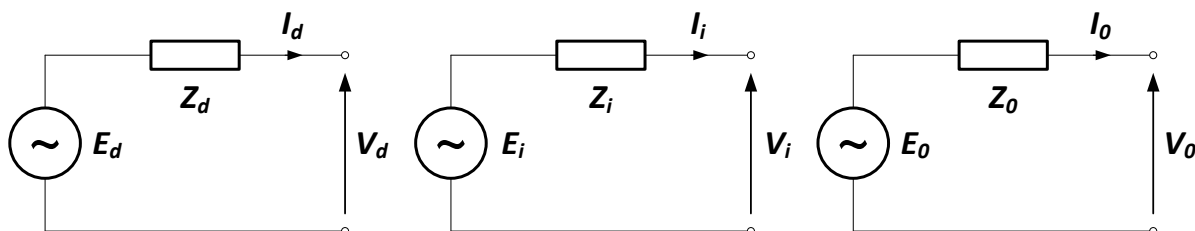


Rješenje:

$$V_{VR} = I_R \cdot R = (I_{Rd} + I_{Ri} + I_{RO}) \cdot R = (I_d + I_i + I_o) \cdot R = \left(\frac{V_d}{R} + \frac{V_i}{R} + \frac{V_o}{\infty} \right) \cdot R = V_d + V_i$$

I_o je nula, jer prema 1. Kirchoffovom zakonu mora biti $I_R + I_S + I_T = 3I_o = 0$.

Relacija (*) posljedica je prikaza trofaznog sustava s tri jednofazna simetrična sustava – direktnim, inverznim i nultim (npr. faze R) slijedećeg oblika:

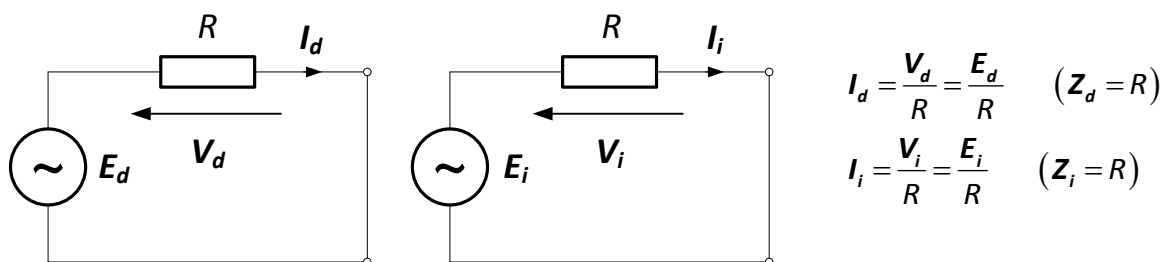


Ovo je prikaz prilika u "d", "i", i "o" sustavu faze R. Iste prilike vladaju i u "d", "i", i "o" sustavu faze S i T samo s faznim pomakom napona i struja.

Da bi se odredile reaktancije Z_d , Z_i i Z_o , pravila su:

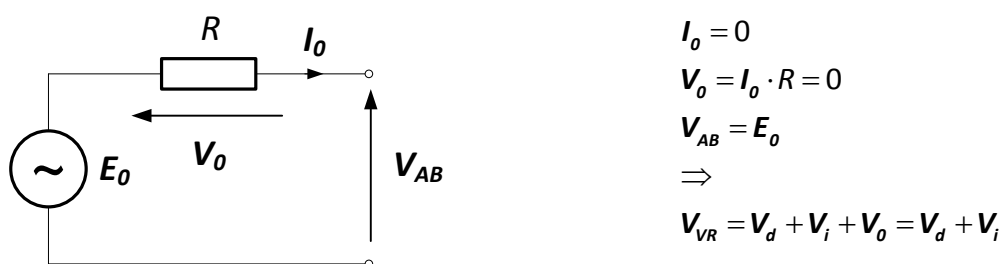
- a) Z_d , Z_i - u nadomjesnoj shemi nultočku generatora i trošila potrebno je spojiti na zajednički povratni vod (bez obzira da li je njihovo zvjezdište doista uzemljeno)

Za naš slučaj:



- b) Z_o - u nadomjesnoj shemi nultog sustava spojene su na povratni vod samo one točke mreže koje su doista uzemljene

Za naš slučaj:



$$V_R = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_S = 200 \angle 270^\circ \text{ V}$$

$$V_T = 100 \angle 120^\circ \text{ V}$$

$$\begin{aligned} V_d &= \frac{1}{3}(V_R + \alpha V_S + \alpha^2 V_T) = \frac{1}{3}(100 \angle 0^\circ + 200 \angle 270^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ + 100 \angle 120^\circ \cdot 1 \angle 240^\circ) \\ &= \frac{100}{3}(1 + \sqrt{3} + j + 1) = 128,79 \angle 15^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V_i &= \frac{1}{3}(V_R + \alpha^2 V_S + \alpha V_T) = \frac{1}{3}(100 \angle 0^\circ + 200 \angle 270^\circ \cdot 1 \angle 240^\circ + 100 \angle 120^\circ \cdot 1 \angle 120^\circ) \\ &= \frac{100}{3}\left(1 - \sqrt{3} + j - 0,5 - j \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 41,31 \angle 173,79^\circ \text{ V} \end{aligned}$$

$$V_{VR} = I_R \cdot R = V_d + V_i = 128,79 \angle 15^\circ + 41,31 \angle 173,79^\circ = 91,50 \angle 24,4^\circ \text{ V}$$

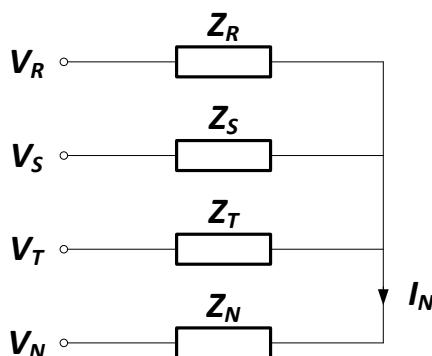
6. Primjer – U trofaznoj mreži s neutralnim vodičem, prema shemi, zadani su nesimetrični naponi

$$V_R = 100 \angle 0^\circ \text{ V}$$

$$V_S = 100 \angle 90^\circ \text{ V}$$

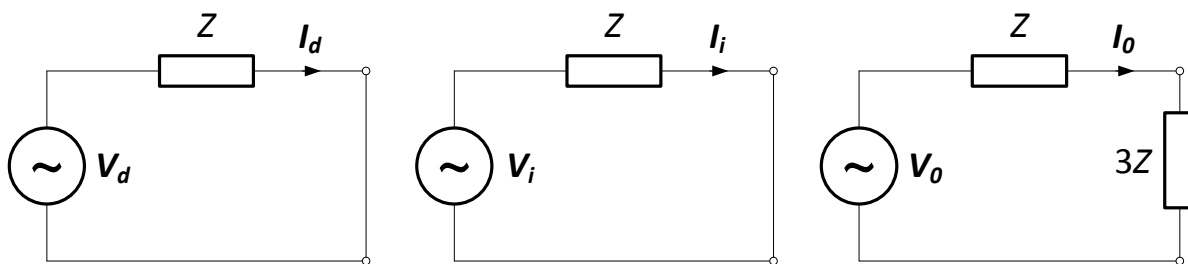
$$V_T = 100 \angle 180^\circ \text{ V}$$

i struja $I_N = 15 \angle 0^\circ \text{ A}$. Odredite struje u pojedinim fazama primjenom metode simetričnih komponenti, uz pretpostavku $Z_R = Z_S = Z_T = Z_N$.



Rješenje:

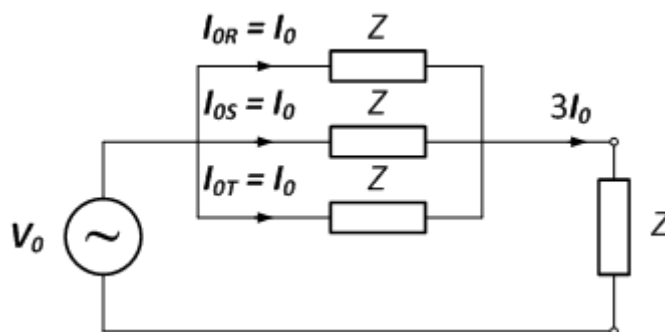
Nadomjesne sheme direktnog, inverznog i nultog sustava faze R:



Objašnjenje $3Z$:

$$I_N = I_R + I_S + I_T = 3I_0.$$

Kako kroz reaktanciju Z_N teče struja $I_N = 3I_0$, onda je u nultoj nadomjesnoj shemi, gdje kroz Z_N teče I_0 , potrebno staviti $3Z_N$ kako bi se nadomjestio isti napon.



$$I_0 = \frac{1}{3} I_N = 5 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$V_d = \frac{1}{3} (V_R + \alpha V_S + \alpha^2 V_T) = \frac{1}{3} (100 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 100 \angle 90^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 100 \angle 180^\circ)$$

$$V_d = \frac{100}{3} \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} + \frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{100}{3} (0,634 + j0,366) = 24,4 \angle 30^\circ \text{ V}$$

$$I_d = \frac{V_d}{Z_d} = \frac{V_d}{Z}$$

$$I_i = \frac{V_i}{Z_i} = \frac{V_i}{Z} \Rightarrow$$

$$V_i = \frac{1}{3} (V_R + \alpha^2 V_S + \alpha V_T) = \frac{1}{3} (100 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 100 \angle 90^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 100 \angle 180^\circ)$$

$$V_i = \frac{100}{3} \left(1 + \frac{\sqrt{3}}{2} - j\frac{1}{2} + \frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2} \right) = \frac{100}{3} (2,366 - j1,366) = 91 \angle -30^\circ \text{ V}$$

$$I_o = \frac{V_o}{Z_o} = \frac{V_o}{4Z}$$

$$V_o = \frac{1}{3} (V_R + V_S + V_T) = \frac{1}{3} (100 \angle 0^\circ + 100 \angle 90^\circ + 100 \angle 180^\circ) = \frac{100}{3} (1 + j - 1) =$$

$$V_o = j \frac{100}{3} = \frac{100}{3} \angle 90^\circ \text{ V}$$

$$V_o = 4Z \cdot I_o \Rightarrow Z = \frac{V_o}{4I_o} = \frac{\frac{100}{3} \angle 90^\circ}{4 \cdot 5 \angle 0^\circ} = \frac{5}{3} \angle 90^\circ \Omega$$

$$I_d = \frac{V_d}{Z_d} = \frac{24,4 \angle 30^\circ}{\frac{5}{3} \angle 90^\circ} = 14,64 \angle -60^\circ \text{ A}$$

$$I_i = \frac{V_i}{Z_i} = \frac{91 \angle -30^\circ}{\frac{5}{3} \angle 90^\circ} = 54,6 \angle -120^\circ \text{ A}$$

$$I_R = I_d + I_i + I_o = 14,64 \angle -60^\circ + 54,6 \angle -120^\circ + 5 \angle 0^\circ = -15 - j60 \text{ A}$$

$$I_S = a^2 I_d + a I_i + I_o = 1 \angle 240^\circ \cdot 14,64 \angle -60^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 54,6 \angle -120^\circ + 5 \angle 0^\circ = 45 \text{ A}$$

$$I_T = a I_d + a^2 I_i + I_o = 1 \angle 120^\circ \cdot 14,64 \angle -60^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 54,6 \angle -120^\circ + 5 \angle 0^\circ = -15 + j60 \text{ A}$$

7. Primjer – Na trofaznu mrežu s nul vodičem priključen je nesimetričan trofazni sustav trošila. Analizom struja utvrđeno je da fazom R teku struje:

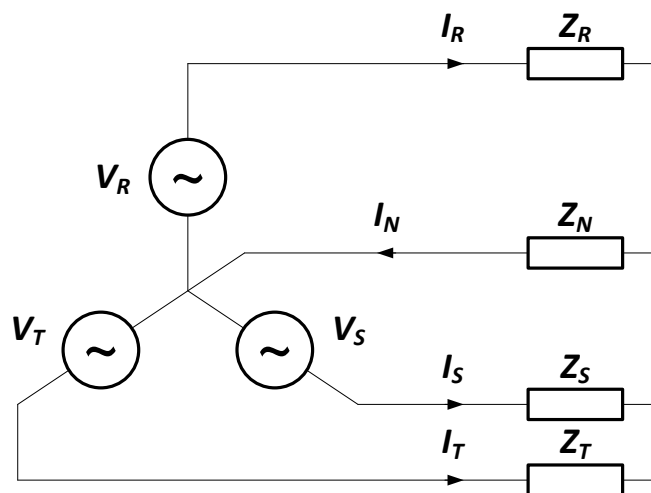
$$I_{Rd} = 200 \angle 0^\circ \text{ A} \text{ i } I_{Ri} = 100 \angle 60^\circ \text{ A}$$

te kroz nul vodič struja $I_N = 300 \angle 300^\circ \text{ A}$.

Ako su inducirane elektromotorne sile simetrične, odredite struje po fazama i faktor snage u fazama

S i T, ako u fazi R on iznosi $\frac{\sqrt{3}}{2}$ (kapacitivno). $Z_N = 0 \Omega$.

Rješenje:



$$I_N = 3I_o \Rightarrow I_o = \frac{I_N}{3} = 100 \angle 300^\circ \text{ A} = I_{Ro} = I_o$$

$$I_R = I_{Rd} + I_{Ri} + I_{Ro} = 200 \angle 0^\circ + 100 \angle 60^\circ + 100 \angle 300^\circ = 300 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$I_S = a^2 I_{Rd} + a I_{Ri} + I_{Ro} = 1 \angle 240^\circ \cdot 200 \angle 0^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 100 \angle 60^\circ + 100 \angle 300^\circ = 300 \angle 240^\circ \text{ A}$$

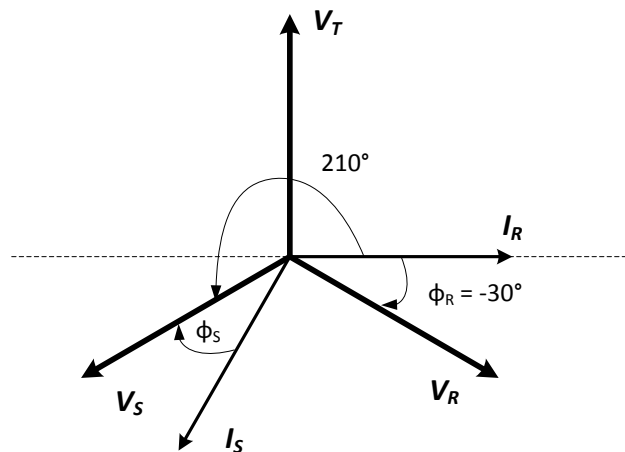
$$I_T = a I_{Rd} + a^2 I_{Ri} + I_{Ro} = 1 \angle 120^\circ \cdot 200 \angle 0^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 100 \angle 60^\circ + 100 \angle 300^\circ = 0 \angle 0^\circ \text{ A}$$

$$\cos \varphi_R = \frac{\sqrt{3}}{2} (\text{kap.}) \Rightarrow \varphi_R = -30^\circ \text{ za } V_R$$

$$\cos \varphi_T = 0 \Rightarrow \text{nema opterećenja!}$$

$$\cos \varphi_S = \cos(\varphi_{V_S} - \varphi_{I_S}) = \cos(210^\circ - 240^\circ)$$

$$= \frac{\sqrt{3}}{2} (\text{kap.})$$



3. Reaktancije i impedancije elemenata sustava u direktnom, inverznom i nultom sustavu

Budući da je napone i struje u pojedinim dijelovima trofazne nesimetrične mreže moguće prikazati naponima i strujama tri simetrična sustava to se onda nameće činjenica da je trofazni nesimetričan sustav moguće nadomjestiti s 3 trofazna simetrična sustava. Kako su prilike u svakom tom simetričnom sustavu jednake po iznosu, ali fazno zakrenute, to je onda moguće prilike u svakom tom simetričnom sustavu promatrati kroz prilike u jednoj fazi simetričnog sustava.

Da bismo uopće proračune s takvim ekvivalentnim shemama mogli i raditi, potrebno je za svaki element nesimetričnog sustava odrediti njegove nadomjesne sheme u direktnom, inverznom i nultom sustavu.

Pri tome vrijede slijedeće pretpostavke:

- Elementi nesimetričnog sustava su (fazno gledano) simetrično građeni – reaktancije elemenata u sve 3 faze su jednake, kao i naponi generatora koji su u sve tri faze jednakog iznosa i odgovarajuće fazno zakrenuti.
- Prilikom određivanja struja kratkog spoja u visokonaponskim mrežama, proračun će biti zanemarivo pogrešan ukoliko računamo s reaktancijom, umjesto s impedancijama. Naime, tako određene struje veće su od stvarnih kao, što smo mogli čuti na predavanjima, a može se pročitati u literaturi¹, a apsolutna pogreška koja se pri tome čini jest:

$$\Delta I = V \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \right)$$

Odnosno, relativna pogreška je

$$\Delta i = \frac{\Delta I}{I} = \frac{V \left(\frac{1}{X} - \frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \right)}{V \left(\frac{1}{\sqrt{R^2 + X^2}} \right)} = \sqrt{\frac{R^2}{X^2} + 1} - 1$$

Prilikom određivanja struja kratkog spoja smatra se da je provedeni proračun dovoljno točan, ako je pogreška manja od 15,5%, što odgovara

$$\frac{R}{X} < 0,577$$

¹ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 40.

Pogledajmo sada kakvi su omjeri R/X elemenata s kojima se mi susrećemo u našim mrežama.

a) sinkroni generatori: $R/X = 0,008 - 0,025$

b) transformatori:

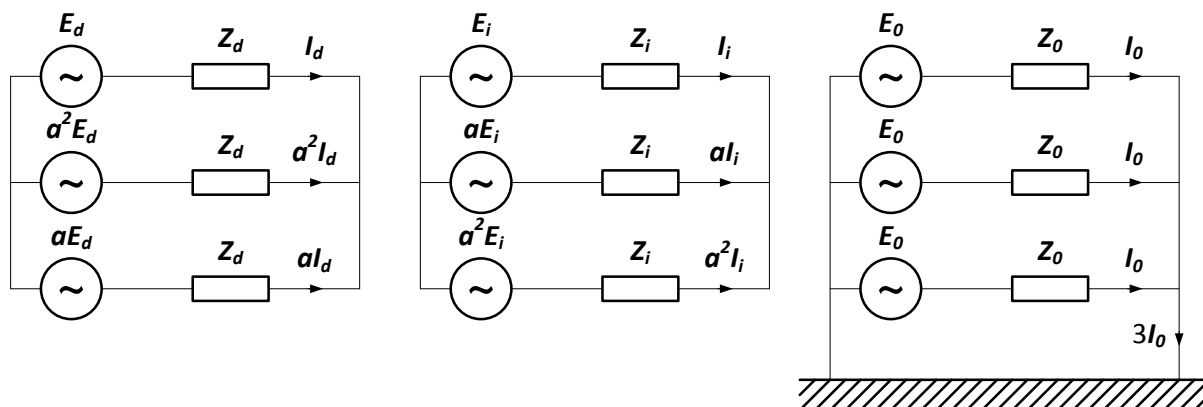
S_n	srednja vrijednost R/X
2,5 MVA	0,100
10 MVA	0,075
50 MVA	0,040
100 MVA	0,030
250 MVA	0,025

c) zračni vodovi: $R/X = 0,10 - 0,50$

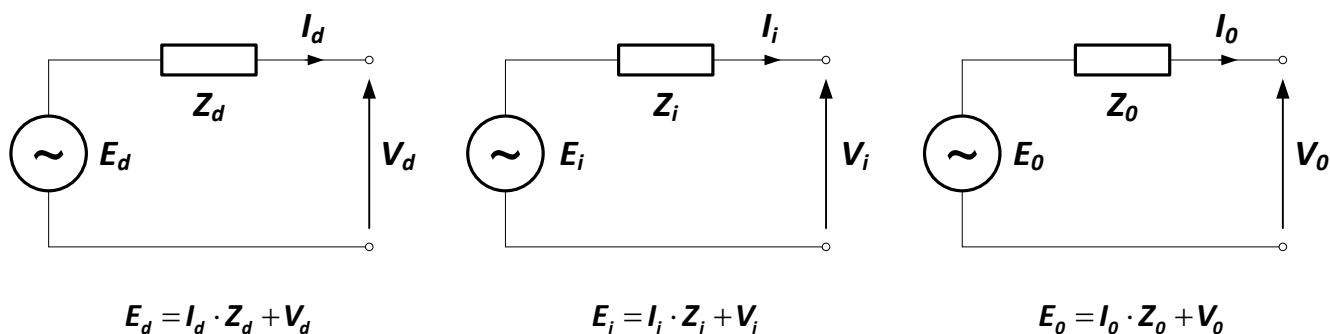
d) kabeli: $R/X = 0,3 - 1,00$ (vrlo rijetko u VN mrežama)

4. Ekvivalentne sheme generatora

Prije nego nacrtamo ekvivalentnu shemu generatora u direktnom, inverznom i nultom sustavu, reći ćemo nekoliko riječi o sustavu prikazivanja. Kao što je već prethodno rečeno, svaki je sustav od tri nesimetrična vektora (napona i struja), koji prezentiraju prilike u nekom dijelu mreže, moguće prikazati s 3 simetrična sustava vektora, zbog čega je onda moguće i nesimetričnu shemu prikazati preko 3 trofazna simetrična sustava.

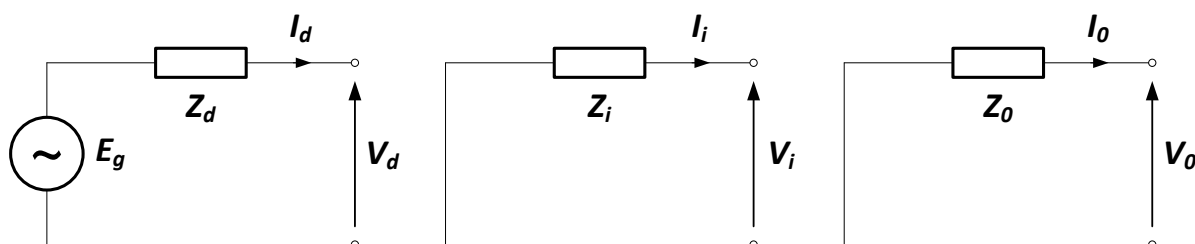


Kako se radi o simetričnim trofaznim sustavima, prilike je u njima moguće promatrati kroz prilike u jednoj njihovoj fazi. Znači promatramo slijedeće jednofazne ekvivalentne sheme za, koje vrijede pripadne naponske jednačbe:



Kako je u najčešćem slučaju na mrežu narinut simetrični sustav elektromotornih sila (bilo od sinkronih generatora, bilo od strane aktivne mreže), to je onda moguće pretpostaviti da su nadomjesne sheme takvih elemenata u "d", "i", i "0" sustavu s $E_i = E_0 = 0$.

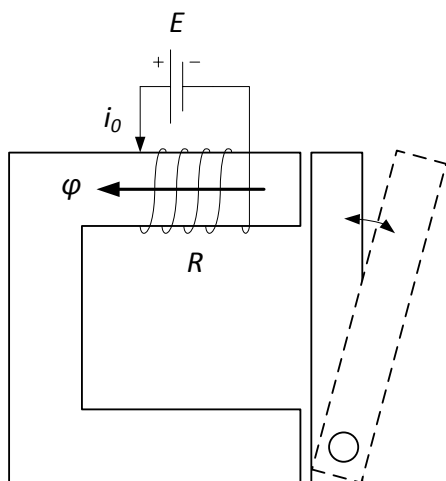
Znači da su nadomjesne shema sinkronog generatora u direktnom, inverznom i nultom sustavu slijedeće:



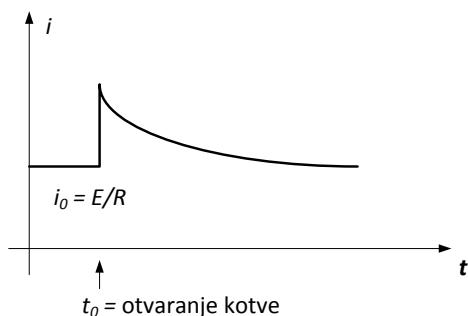
U ovim shemama potrebno je još odrediti Z_d , Z_i i Z_o , odnosno kako smo rekli da ćemo zanemarivati R – djelatni otpor, potrebno je odrediti X_d , X_i i X_o sinkronog generatora u navedenoj jednofaznoj nadomjesnoj shemi triju simetričnih sustava (direktnom, inverznom, nultom).

Reaktancije sinkronog generatora

Prije nego što se počnemo baviti reaktancijama sinkronog generatora, potrebno je prisjetiti se jedne fizikalne pojave koja se naziva **magnetska tromost**.



Slika 3



Slika 4

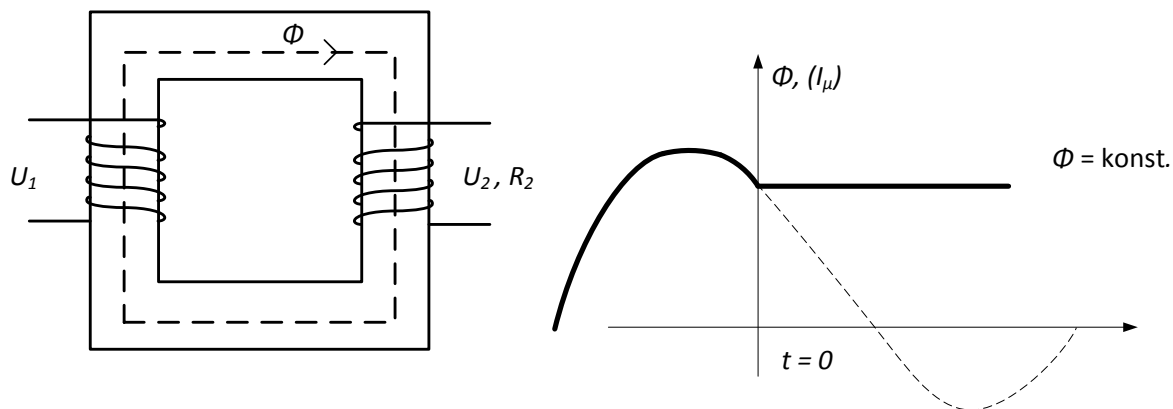
Promotrimo strujni krug koji se sastoji od akumulatorske baterije i svitka koji ima određeni induktivitet i djelatni otpor (Slika 3). Svitkom je ulančan magnetski tok. Struja kroz namot određena je naponom baterije i djelatnim otporom namota.

U jednom trenutku otvara se kotva, čime se povećava magnetski otpor na putu magnetskih silnica. Kako se magnetski tok kroz svitak ne može trenutno promijeniti na novu (manju) stacionarnu vrijednost, jer bi se time na stezaljkama svitka inducirao beskonačno veliki napon, mora porasti struja u svitku na toliku vrijednost da se u prvom trenutku promjene prilika u krugu održi stalan magnetski tok svitka. Kako će se nagomilana energija magnetskog toka (koja se ne može trenutno potrošiti) trošiti na djelatnom otporu (znači dolazi do zagrijavanja otpora – Jouleova toplina), tako pada i vrijednost struje u krugu svitka ponovno na stacionarnu vrijednost:

$$i_0 = \frac{E}{R}.$$

Pri tome je nužno primijetiti da opisana prijelazna pojava duže traje što je vrijednost djelatnog otpora namota R manja. Graf pojave dan je na slici (Slika 4).

Još jedan primjer na kojemu ćemo objasniti pojam magnetske tromosti jest primjer transformatora kojem je primarni namot priključen na mrežu, dok mu je sekundarni namot u praznom hodu. U ovome je slučaju namotima ulančan izmjenični magnetski tok koji u primarnom namotu inducira protuelektromotornu silu, koja se suprotstavlja narinutom naponu iz mreže (Slika 5).



Slika 5

Neka je u nekom trenutku došlo do kratkog spoja sekundarnog namota i neka pri tome vrijednost magnetskog toka ulančanog sekundarnim namotom nije nula. Da bi u trenutku pojave kratkog spoja u sekundarnom namotu ulančani magnetski tok ostao nepromijenjen, potrebna je istosmjerna komponenta struje. Trenutna pojava istosmjerne struje u sekundarnom namotu promijenila bi tok ulančan primarnim namotom, kada se istodobno ne bi i u primarnom namotu pojavila istosmjerna komponenta struje. Osim toga, izmjenični će tok u primarnom namotu i dalje postojati kako bi inducirao elektromotornu silu koja se suprotstavlja naponu narinutom iz mreže. Proizvodnja izmjeničnog toka, obuhvaćenog primarnim namotom, traži izmjeničnu komponentu struje u primarnom namotu. Taj bi tok proizveo izmjenični tok kroz sekundarni namot da se nije pojavila i izmjenična komponenta sekundarne struje, koja svojim amperzavojima poništava djelovanje amperzavoja izmjenične struje u primarnom namotu. Prema tomu, u oba namota teku i istosmjerna i izmjenična komponenta struje kratkog spoja. Izmjenične se komponente struje održavaju od strane mreže narinutom naponu pa će one ostati i nakon nestanka istosmjerne komponente koja u oba namota opada kako se energija magnetskog toka troši u djelatnom otporu namota. Pri tome veličina istosmjerne komponente struje kratkog spoja ovisi o veličini toka obuhvaćenog sekundarnim namotom u trenutku nastanka kratkog spoja. Vrijednost struje opada eksponencijalno, što je posljedica rješenja slijedeće diferencijalne jednadžbe koja vrijedi za sekundarni strujni krug.

U trenutku nastanka kratkog spoja:

$$R \cdot i + L \frac{di}{dt} = 0$$

$$\Rightarrow i = i_0 e^{-\frac{t}{L/R}}$$

gdje su:

i_0 - vrijednost struje u trenutku nastanka kratkog spoja

R i L - djelatni otpor i induktivitet strujnog kruga.

Prilike u generatoru za vrijeme trajanja kratkog spoja

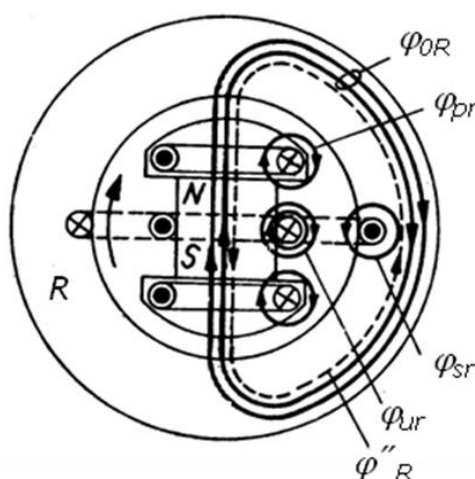
Promatramo prilike u sinkronom generatoru s istaknutim polovima (hidrogeneratori), koji sadrži uzbudni namot i prigušni kratkospojeni namot, kojim u normalnom pogonu ne teče struja, u slučaju kada se u nekom trenutku praznog hoda sinkronog generatora (SG) dogodi kratki spoj na statorskim stezaljkama generatora.

Okretno protjecanje SG podijeliti ćemo na njegove dvije komponente – uzdužnu i poprečnu, jer se magnetski otpor kojeg vide silnice koje uzrokuju pojedina protjecanja znatno razlikuju. U smjeru uzdužnog protjecanja zračni je raspored manji, time je magnetski otpor manji, a samim time i uzdužna reaktancija generatora $X \approx 1/R_m$ veća, od poprečne reaktancije generatora koju ćemo stoga odvojeno promatrati.

Pri tomu je važno napomenuti da je djelovanje prigušnog namota, zbog njegovog rasporeda na rotoru, u obje osi (uzdužnoj i poprečnoj) i promatrati ćemo ga odvojeno za poprečnu te odvojeno za uzdužnu os.

Djelovanje uzbudnog namota rotora samo je u smjeru uzdužne osi zbog njegovog položaja na rotoru.

Uzdužna (direktna) reaktancija generatora



Slika 6

Sastavne komponente su (Slika 6):

- magnetski tok prigušnog namota (njegove uzdužne komponente)
- magnetski tok statora
- magnetski tok rotora
- tok uzbude rotora koji je u trenutku KS-a bio ulančan statorskim namotom
- rasipni magnetski tok statora

U praznom hodu generatora vrijedi:

1. postoji samo protjecanje rotorskog uzbudnog namota, koje inducira napon na stezaljkama SG-a
2. struja kroz prigušni namot je nula.

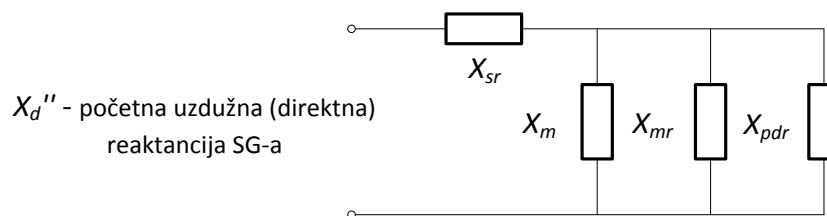
U trenutku kratkog spoja moraju ostati magnetski tokovi ulančani statorskim i rotorskim namotom nepromijenjeni. Zbog toga se u **statorskom namotu** pojavljuju struje:

1. istosmjerna komponenta koja nastoji održati magnetski tok statorskog namota stalnim i koja se zbog gubitka magnetske energije tog toka na djelatnom otporu gubi do nulte vrijednosti
2. izmjenična komponenta koja nastoji održati magnetski tok statorskog namota stalnim i koja se zbog rotacije rotora inducira u statorskom namotu.

Novonastale struje u statorskom namotu bi promijenile tok kroz uzbudni i prigušni namot rotora, ako im se u tomu ne bi suprotstavile struje u rotorskim namotima pa se tako u rotorskim namotima javlja:

1. istosmjerna komponenta struje koja se superponira na postojeću uzbudnu, koja se javlja kao reakcija na protjecanje koje uzrokuju izmjenična protjecanja triju faza statora
2. izmjenična komponenta struje kao reakcija koja poništava magnetski tok istosmjerne statorske struje, koja se stoga zatvara kroz zrak, a ne rotor.

Prema tome je nadomjena shema generatora u početnom trenutku kratkog spoja (Slika 7),



Slika 7

gdje su:

X_{pdr} - reaktancija koja je posljedica magnetskog otpora na putu magnetskih silnica koje uzrokuju struje prigošnog namota (njegove uzdužne komponente); silnice se zatvaraju kroz zrak

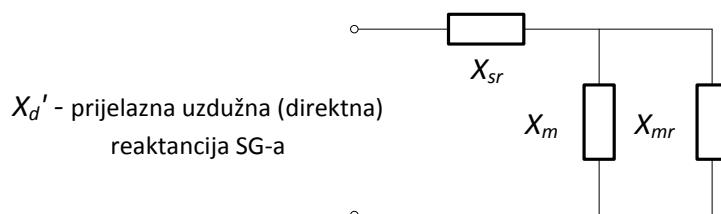
X_m - reaktancija koja je posljedica magnetskog otpora na putu magnetskih silnica koje uzrokuje stacionarna struja kratkog spoja kroz rotorski namot

X_{mr} - reaktancija koja je posljedica magnetskog otpora na putu magnetskih silnica koje uzrokuje struja rotorskog namota, a koje se zbog reakcije statora početno moraju zatvoriti kroz zrak

X_{sr} - reaktancija zbog magnetskog otpora na putu rasipnih magnetskih silnica statora

Zbog vrlo velikog otpora prigušnog namota već nakon 0,5 s dolazi do prigušenja struja u prigušnom namotu, a nastalih u trenutku kratkog spoja kako bi postojeći magnetski tok ulančan prigušnim namotom ostao nepromijenjen – $X_{pdr} = \infty$.

Znači da je sada reaktancija SG-a:

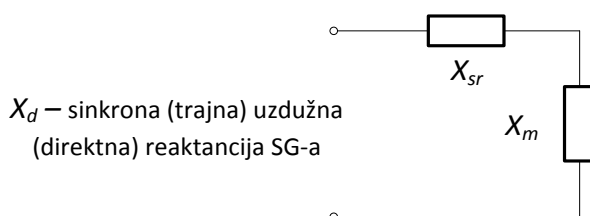


Na kraju, nakon oko 1 s nastupa stacionarno stanje za kojeg je karakteristično da su se u **statorskom** namotu prigušile:

1. istosmjerna komponenta struje na nulu
2. izmjenična komponenta struje na stacionarnu vrijednost koja odgovara stalnoj reaktanciji SG-a, dakle X_d

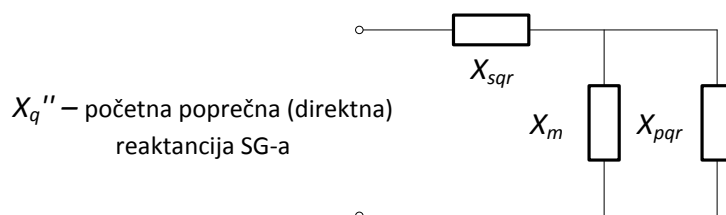
U rotorskom namotu su se prigušile:

1. istosmjerna komponenta struje na stacionarnu vrijednost
2. izmjenična komponenta struje na nulu

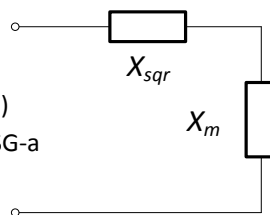


Poprečna (direktna) reaktancija generatora:

Kako uzбудni namot ne djeluje u smjeru poprečne osi generatora, to će se onda samo u poprečnoj komponenti prigušnog namota inducirati izmjenične struje kao reakcija na protjecanje statorskog namota u poprečnoj osi. To znači da će nakon prigušenja tih struja, što traje kratko (cca 0,5 s), odmah nastati stacionarno, a ne prijelazno stanje. Prema tome su poprečne direktne reaktancije SG-a:



$X_q' = X_q$ – stacionarna (trajna)
poprečna (direktna) reaktancija SG-a



Inverzna reaktancija generatora

Inverznu reaktanciju generatora moguće je odrediti tako da se uz kratko spojeni rotorski namot, na statorski namot narine trofazni napon inverznog redoslijeda. Tada bismo dobili za

$$X_i = \frac{2X_d'' \cdot X_q''}{X_d'' + X_q''} \quad (\text{donja granica})$$

Navedeni izraz predstavlja donju granicu inverzne reaktancije SG-a, dok je gornja granica za inverznu reaktanciju SG-a

$$X_i = \frac{X_d'' + X_q''}{2}$$

Razlika vrijednosti inverzne reaktancije proračunate prema donjem i gornjem izrazu ovise o omjeru X_q''/X_d'' . U literaturi² su dani omjeri X_i/X_d'' određeni po obje relacije za različite omjere X_q''/X_d'' . Moguće je primijetiti da razlika između X_i određenom po jednoj i po drugoj relaciji opada kako raste X_d'' , što znači da ako uz X_d'' generatora uzmemo u obzir i reaktancije izvan generatora (znači, što se više odmičemo od stezaljki generatora).

Nulta reaktancija generatora

Nulta reaktancija generatora ovisi o izvedbi generatora i iznosi:

$$X_0 = \omega(L_0 - 2M_0)$$

gdje su:

L_0 - induktivitet statorskog namota

M_0 - međuinduktivitet dvije faze statorskog namota.

Ako zvjezdište generatora nije uzemljeno (što je čest slučaj u našim mrežama), onda se za X_0 uzima beskonačni iznos.

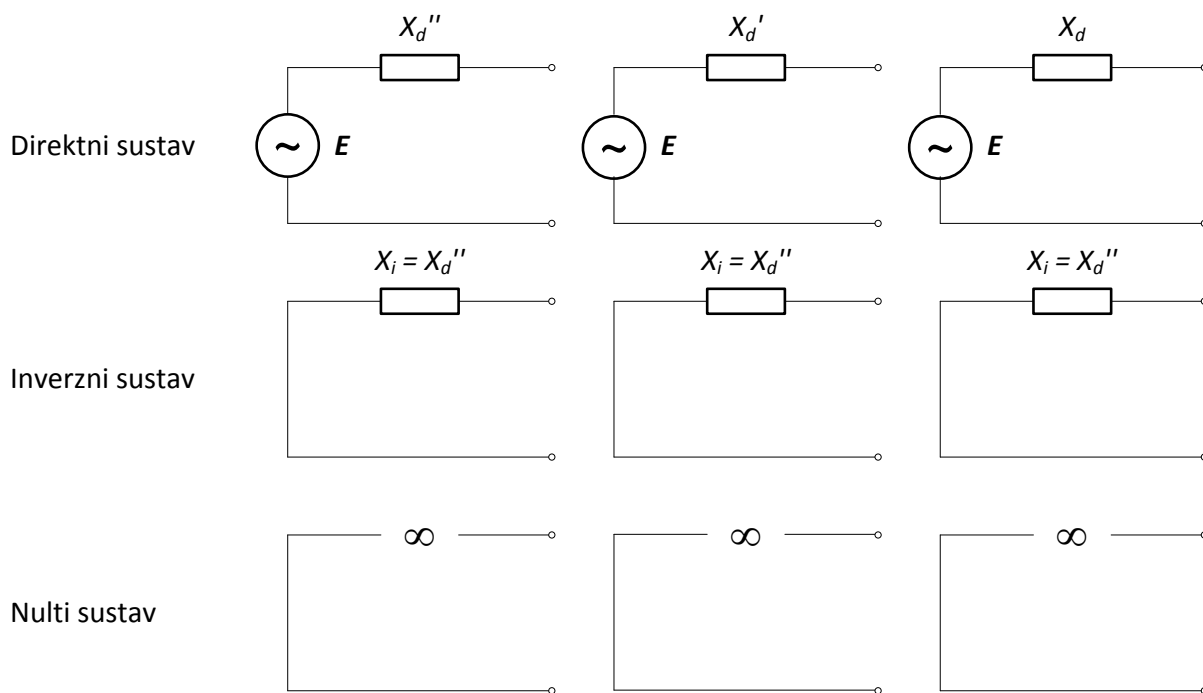
Prilikom proračuna struja kratkog spoja **pretpostavlja se da su svi generatori turbogeneratori**, što znači da $X_d'' = X_q''$, tj. ne pravi se razlika između uzdužnih i poprečnih reaktancija generatora. Greška koja se pri tome čini manja je što se mjesto kratkog spoja nalazi dalje od generatora

² Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 69.

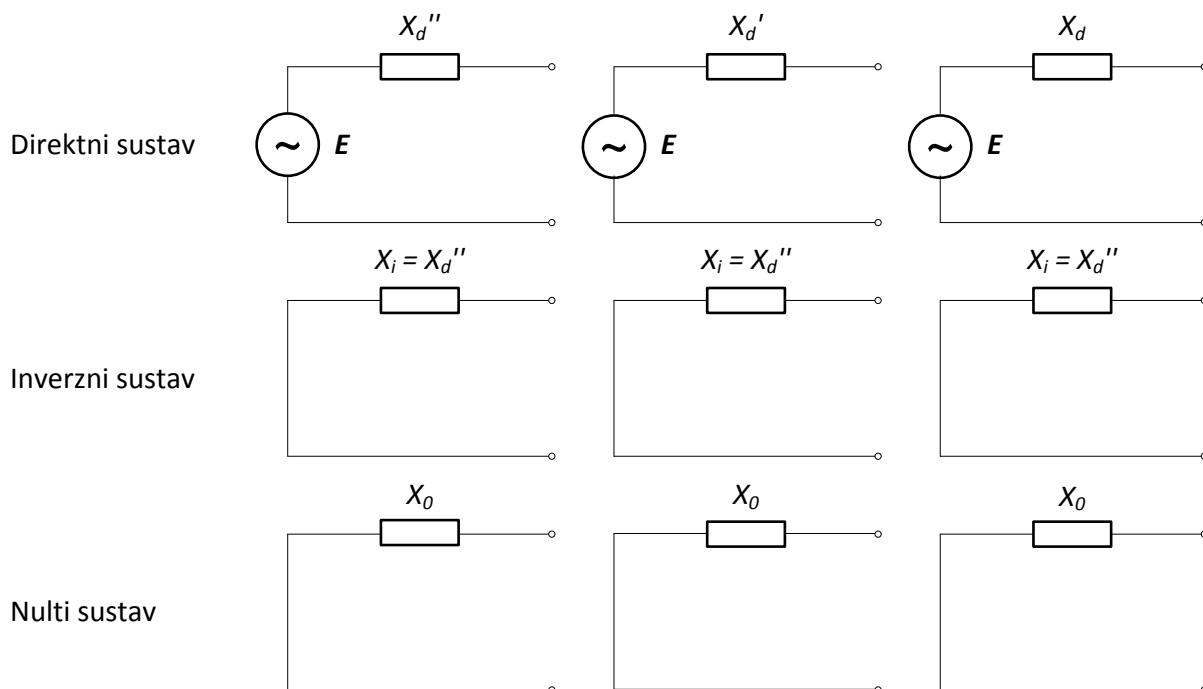
(reaktancije pasivnih elemenata mreže imaju samo uzdužnu komponentu). Prema tome su onda jednofazne nadomjesne sheme generatora u direktnom, inverznom i nultom sustavu, kako je prikazano u nastavku.

Vrijednosti koje se susreću u praksi mogu se pronaći u literaturi³.

a) Kada je zvjezdište generatora izolirano:



b) Kada zvjezdište generatora nije izolirano:



³ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 70.

U literaturi⁴ je moguće vidjeti granice relativnih reaktancija SG-a kakve se susreću u praksi. Sve reaktancije obično se prikazuju u relativnim veličinama (x) koje su definirane relacijom:

$$x = \frac{X \cdot I_n}{V_n} = \frac{X \cdot I_n \cdot 3V_n}{V_n \cdot 3V_n} = \frac{X \cdot S_n}{(\sqrt{3}V_n)^2} = \frac{X \cdot S_n}{U_n^2}$$

$$x_{\%} = x \cdot 100 (\%) \Rightarrow X = \frac{x_{\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} [\Omega]$$

8. Primjer – Odrediti reaktancije generatora nazivnog napona 10 kV, nazivne snage 20 MVA, ako su zadane relativne vrijednosti reaktancija:

$$x_{d\%} = 130 \%;$$

$$x_{d\%}' = 30 \%;$$

$$x_{d\%}'' = 20 \%;$$

$$x_{i\%} = 18 \%.$$

Rješenje:

$$X_d = \frac{x_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{130}{100} \cdot \frac{10^2}{20} = 6,5 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_d' = \frac{x_{d\%}'}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{30}{100} \cdot \frac{10^2}{20} = 1,5 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_d'' = \frac{x_{d\%}''}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{20}{100} \cdot \frac{10^2}{20} = 1 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_i = \frac{x_{i\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{18}{100} \cdot \frac{10^2}{20} = 0,9 \Omega \text{ (po fazi)}$$

⁴ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 70, tablica 2.1

5. Ekvivalentne sheme dvonamotnih transformatora

Direktna reaktancija dvonamotnog transformatora

Direktna reaktancija dvonamotnog transformatora odgovara reaktanciji kratkog spoja X_k transformatora, koju možemo dobiti iz pokusa kratkog spoja, tako da uz kratko spojene sekundarne stezaljke transformatora na primarnu stranu narinemo takav napon V_{k1} , tako da primarnim namotom teče nazivna struja I_{n1} .

$$X_{d1} = X_{k1} = \frac{V_{k1}}{I_{n1}} [\Omega]$$

Ako s u_k označimo relativni napon kratkog spoja, odnosno omjer

$$u_{k\%} = \frac{V_{k1}}{V_{n1}} \cdot 100\% \text{ ili } u_k = \frac{V_{k1}}{V_{n1}}, \text{ onda vrijedi:}$$

$$X_{d1} = \frac{V_{k1}}{V_{n1}} \cdot \frac{V_{n1}}{I_{n1}} \cdot \frac{100}{100} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{V_{n1}}{I_{n1}} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{3V_{n1} \cdot V_{n1}}{3V_{n1} \cdot I_{n1}} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_n} [\Omega].$$

Da smo proveli kratki spoj s druge strane transformatora, što znači da smo kratko spojili stezaljke primarnog namota, a na sekundarnu stranu narinuli takav napon V_{k2} da sekundarnim namotom teče nazivna struja I_{n2} , onda bismo za reaktanciju kratkog spoja transformatora dobili:

$$X_{d2} = X_{k2} = \frac{V_{k2}}{I_{n2}} [\Omega]$$

odnosno:

$$X_{d2} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_{n2}^2}{S_n} [\Omega]$$

Očigledno je da se reaktancije X_{d1} i X_{d2} razlikuju i da vrijedi da je

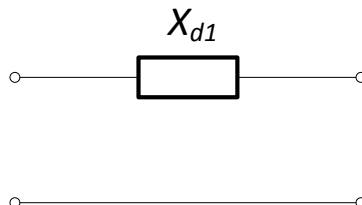
$$\frac{X_{d1}}{X_{d2}} = \left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right)^2$$

no, istodobno vrijedi da je: $u_{k1} = u_{k2} = u_k$, jer vrijedi (invarijantnost snage):

$$\begin{aligned} V_{k1} \cdot I_{n1} &= V_{k2} \cdot I_{n2} \\ V_{n1} \cdot I_{n1} &= V_{n2} \cdot I_{n2} \\ \Rightarrow \frac{V_{k1}}{V_{n1}} &= \frac{V_{k2}}{V_{n2}} \Rightarrow u_{k1\%} = u_{k2\%} = u_{k\%} \end{aligned}$$

Stoga se redovito kao karakteristična veličina transformatora zadaje ne njegova reaktancija, već u_k – relativni napon kratkog spoja.

Kada bismo za nadomjesnu shemu transformatora u direktnom sustavu uzeli da je:



napravili bismo pogrešku, jer u primarnoj struji postoji i struja magnetiziranja, čiji je udio u nazivnoj struji transformatora malen, ali koja u praznom hodu teče primarnim namotom i koja se onda u nadomjesnoj shemi transformatora zatvara kroz reaktanciju X_{m1} , koja je prema tome:

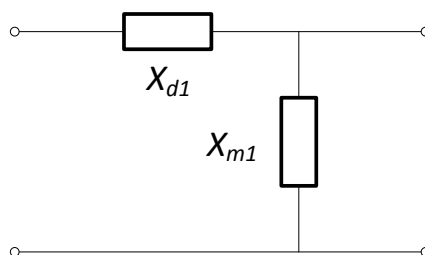
$$X_{m1} = \frac{V_{n1}}{I_{m1}}$$

Označimo li relativnu struju magnetiziranja s $i_m = I_{m1}/I_{n1}$ vrijedi:

$$X_{m1} = \frac{V_{n1}}{m \cdot I_{n1}} = \frac{V_{k1}}{u_k \cdot i_m \cdot I_{n1}} = \frac{X_{d1}}{i_m \cdot u_k}.$$

Kako su prosječne vrijednosti i_m i u_k za transformatore $i_m = 0,1$ i $u_k = 0,1$, vrijedi

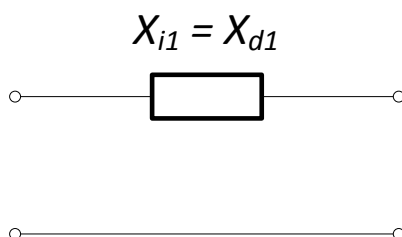
$$X_{m1} = \frac{X_{d1}}{0,1 \cdot 0,1} \cong X_{d1} \cdot 100 [\Omega].$$



Zbog toga se redovito u direktnoj i inverznoj nadomjesnoj shemi transformatora zanemaruje ova poprečna reaktancija ($X_{m1} \gg X_{d1}$).

Inverzna reaktancija dvonamotnog transformatora

Inverznu reaktanciju dvonamotnog transformatora X_{i1} možemo dobiti analognim pokusom kratkog spoja na sekundarnoj strani transformatora, kao i u slučaju određivanja direktne reaktancije transformatora X_{d1} , samo što su se u pokusu zamijenile dvije faze. Time će se dobiti reaktancija $X_{i1} = X_{d1}$. Analogno vrijedi za $X_{i2} = X_{d2}$. Jednakost direktne i invertne reaktancije vrijedi za sve elemente mreža koji nemaju rotirajućih dijelova – to su pasivni elementi mreža.



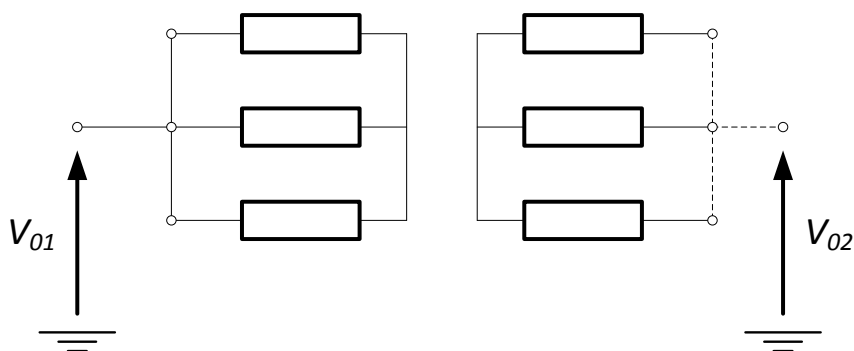
Nulta reaktancija dvonamotnog transformatora

Nulta reaktancija dvonamotnog transformatora ovisi o:

- izvedbi (peterostupna jezgra, trostupna jezgra, s ili bez kotla)
- spoju namota
- uzemljenju nul - točke transformatora

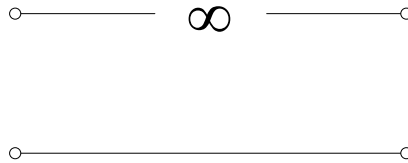
Zvijezda – zvijezda spoj (Yy)

S izoliranom nul – točkom:

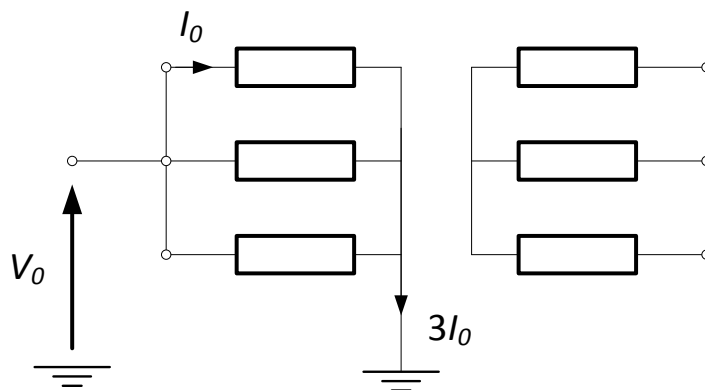


Ako na sve tri faze narinemo istofazni izmjenični napon, neće namotom poteći struja, jer zbroj struja mora biti nula, budući da zvjezdište namota nije uzemljeno. To ne može biti ni u kojem slučaju, jer ovi naponi uzrokuju istofazne struje u sve tri faze pa se nikakve struje u namotu neće pojaviti. Stoga struja neće biti ni u sekundarnom namotu. Isto vrijedi i ako narinemo istofazne napone na sekundarnu stranu. Opet se u oba namota neće pojaviti struja pa možemo uzeti da je $X_0 = \infty$.

$$X_{01} = X_{02} = \infty$$

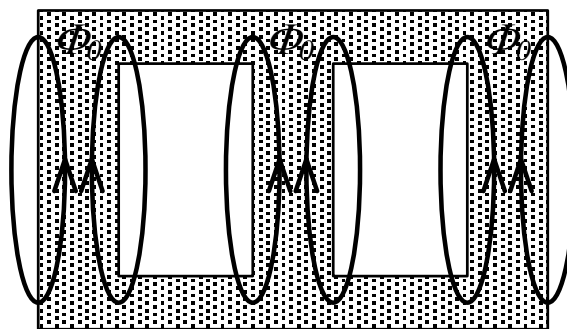


S jednom uzemljenom i jednom izoliranom nultočkom:



Ako s primarne strane transformatora, kojemu je primar uzemljen a sekundar nije, narinemo u sve tri faze istofazan izmjenični napon, primarnim će namotom poteći kroz sve tri faze istofazne struje. Veličina tih struja ovisi o izvedbi jezgre transformatora pa tako i nulta reaktancija transformatora.

a) Ako transformator ima trostupnu jezgru:

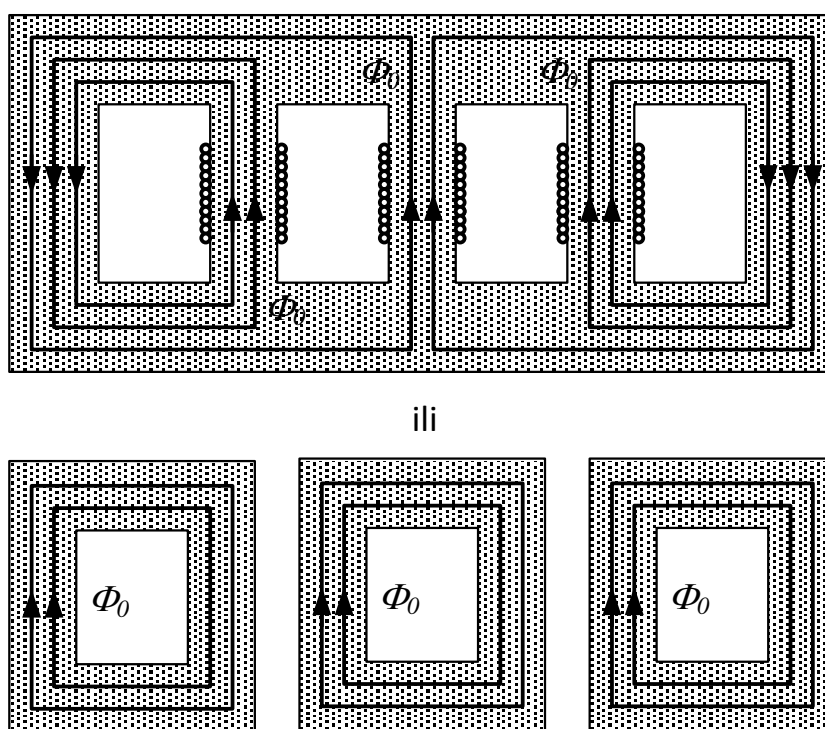


Slika 8

Prilike ne odgovaraju onima u praznom hodu transformatora, jer se ovdje radi o istofaznim protjecanjima u svim fazama (u praznom hodu su protjecanja međusobno zakrenuta za 120° i stoga se mogu zatvarati kroz željezo, $X_m = 100X_d$) pa moraju ići i kroz zrak, zašto je potrebna puno veća struja magnetiziranja pa je $X_0 = 4-5 X_d$. Ono što je jednako situaciji u praznom hodu jest da nema struja u oba slučaja u sekundarnom namotu (u oba slučaja kroz primarni namot teku struje magnetiziranja).

Budući da su magnetski tokovi u nultom sustavu uzrokovani istofaznim strujama oni se moraju zatvarati kroz zrak ili kotao. Zrak ima velik magnetski otpor pa bi se u namotu inducirala odgovarajuća protuelektromotorna sila narinutom naponu V_0 . Usto, biti će potrebna znatna struja (zbog velikog R_m) da bi se ostvario potreban magnetski tok. To onda znači da je X_0 malena ($X_0 = 4-5 X_d$). Ako se magnetski tok i zatvori kroz obližnji magnetski vodljivi kotao, bez obzira što je sad magnetki otpor kojeg vide silnice manji, ipak će promjenjivi magnetski tok u kotlu inducirati vrtložne struje, koje opet zahtijevaju struje u primarnom namotu (jednakost protjecanja) pa će struja primarnog namota tek neznatno pasti, a da pri tome bude inducirana odgovarajuća elektromotorna sila koja odgovara primarno narinutom naponu ($X_0 = 10-15 X_d$).

b) Ako transformator ima peterostupnu jezgru ili su tri jednofazna transformatora spojena u zvijezdu:



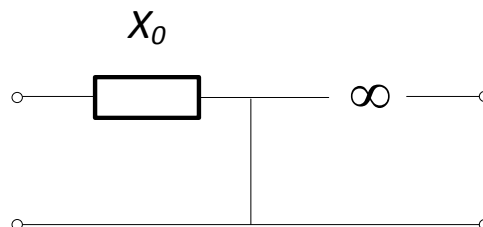
Slika 9

U slučaju peterostupne jezgre se magnetski tokovi zatvaraju kroz željezo, ali su dodani vanjski presjeci željeza manjeg presjeka pa je magnetski otpor na putu ovih okova nešto veći od magnetskog otpora na putu silnica u praznom hodu zbog čega je potrebna i nešto veća struja u namotu, odnosno $X_0 < X_m$ (reaktancija je obrnuto proporcionalna magnetskom otporu).

U slučaju 3 odvojene jezgre, odnosno 3 jednofazna transformatora spojena u zvijezdu imamo prilike kao upraznom hodu, kada primarom teče samo mala struja magnetiziranja, zbog čega je $X_0 = X_m = 100X_d$. Ako bismo s druge strane transformatora narinuli 3 istofazna napona, niti sekundarnim pa tako niti primarnim namotom nebi potekle struje (jer je njihov zbroj nije nula pa se nemaju gdje zatoriti), jer zvijezdište nije uzemljeno na sekundarnoj strani. Stoga je s te strane transformatora $X_0 = \infty$.

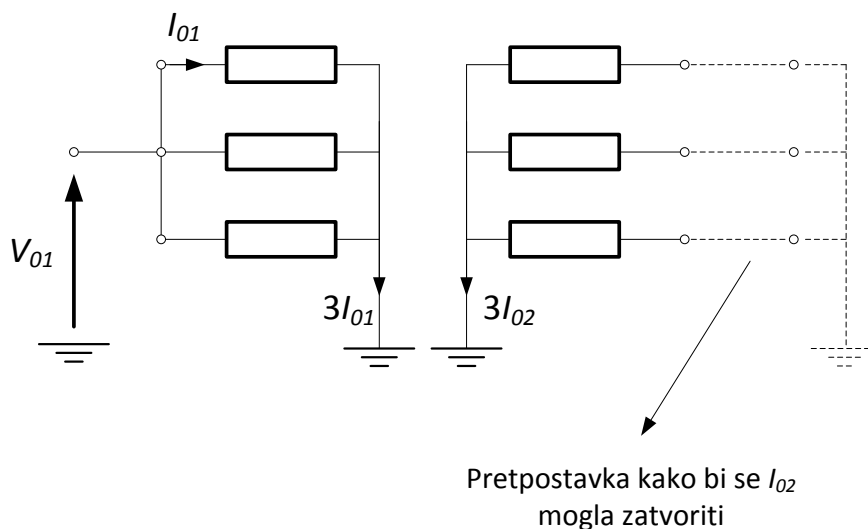
X_0	izvedba
$4-5 X_d$	trostupna jezgra bez kotla
$10-15 X_d$	trostupna jezgra s kotlom
$X_0 < X_m = 100 X_d$	peterostupna jezgra
$X_0 = 100 X_d$	3 odvojene jednofazne jezgre

Nadomjesna shema:



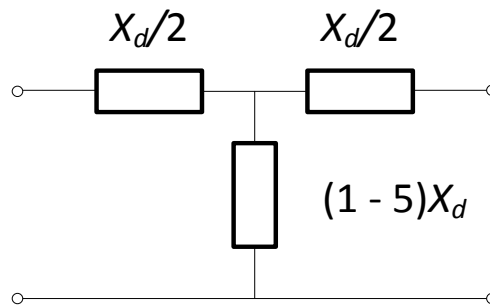
S obje neposredno uzemljene nul - točke:

Prilike kao u normalnom pogonu, samo što se tok Φ_0 mora zatvoriti kroz željezo/zrak, ovisno o izvedbi jezgre.



Ako s primarne strane ovakvog transformatora narinemo 3 napona u fazi, u primarnom će namotu poteći struje, koje će uz pretpostavku da se u mreži sa sekundarne strane negdje pojavljuje uzemljenje, inducirati struje I_{02} . Amperzavoji struje sekundara opiru se svojim magnetskim tokom magnetskom toku od dijela amperzavoja primarnog namota. Preostali dio amperzavoja služi za magnetiziranje jezgre. Magnetski tok Φ_0 , koji je posljedica tih malenih amperzavoja, mora se suprotno prilikama u normalnom pogonu ili prilikama u pokusu KS-a zatvoriti kroz zrak. Uzrok tome je što su ti tokovi istofazni u slučaju narinutog nultog napona, a u normalnom pogonu te pokusu KS-a su fazno pomaknuti za 120° . Kako je njihov zbroj u zadnjem slučaju nula oni se zatvaraju kroz željezo pa je R_{m0} u tom slučaju manji od R_{m0} kojeg vidi magnetski tok Φ_0 u slučaju istofaznih izmjeničnih napona, kada se Φ_0 zatvara kroz zrak, pa je tako $X_m = 1-5 X_d$, a ne $100 X_d$.

Prema tome je nadomjesna shema transformatora:



Ukoliko je $X_m = 5 X_d$ slijedi:

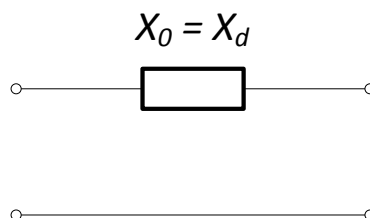
$$X_0 = \frac{X_d}{2} + \frac{5X_d \cdot \frac{X_d}{2}}{5X_d + \frac{X_d}{2}} = \frac{X_d}{2} + \frac{5X_d}{11} = \frac{21X_d}{22} = 0,95X_d$$

Inače je (za trostupnu jezgru):

$$X_0 \in (0,8X_d - 0,95X_d)$$

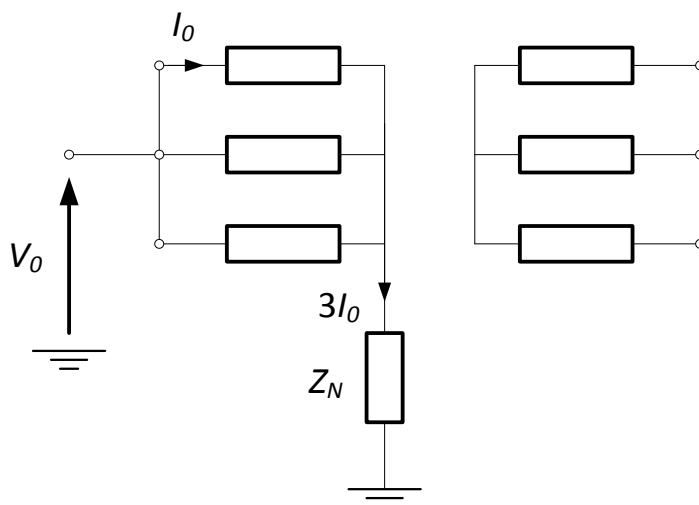
X_0	izvedba
$0,8-0,95 X_d$	trostupna jezgra
$X_0 = X_d$	3 odvojene jednofazne jezgre
$X_0 = X_d$	peterostupna jezgra

Radi jednostavnosti proračuna uzimamo da je $X_0 = X_d$, odnosno slijedeća nadomjesna shema dvonamotnog transformatora:



U slučaju da je jezgra transformatora peterostupna ili da su u pitanju tri jezgre jednofaznih transformatora spojenih u zvijezdu, vrijedilo bi $X_m = 100X_d$ pa je $X_0 = X_d$ (jer se X_m može zanemariti). To je stoga što se onda Φ_0 može zatvoriti kroz željezo.

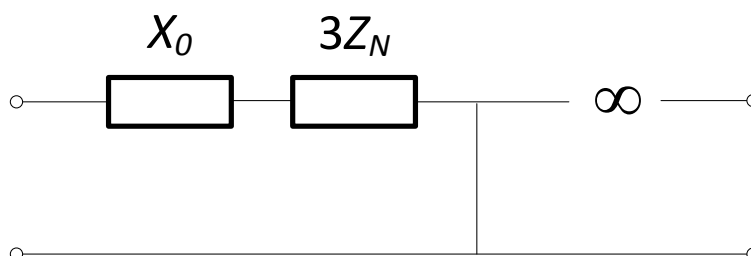
S jednom posredno uzemljenom nul - točkom:



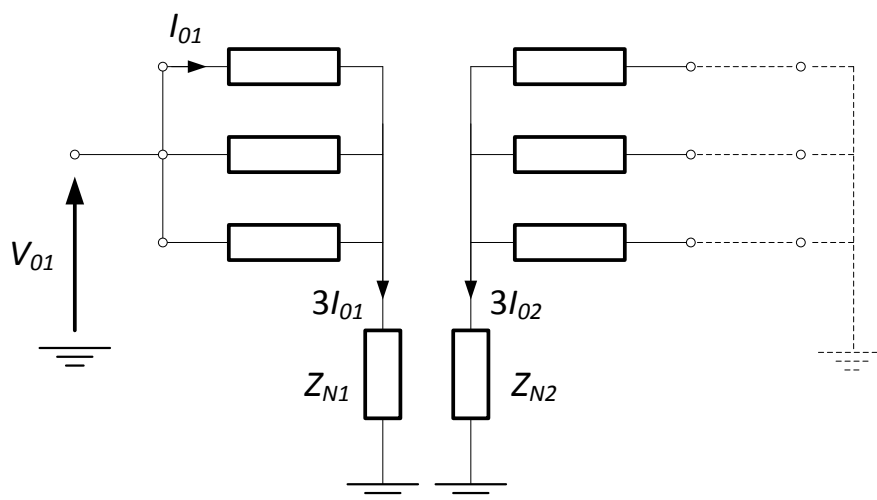
Vrjedi ista priča kao i u slučaju jedne uzemljene nul – točke:

X_0	izvedba
$4-5 X_d$	trostupna jezgra bez kotla
$10-15 X_d$	trostupna jezgra s kotlom
$X_0 < X_m = 100 X_d$	peterostupna jezgra
$X_0 = 100 X_d$	3 odvojene jednofazne jezgre

Nadomjesna shema:

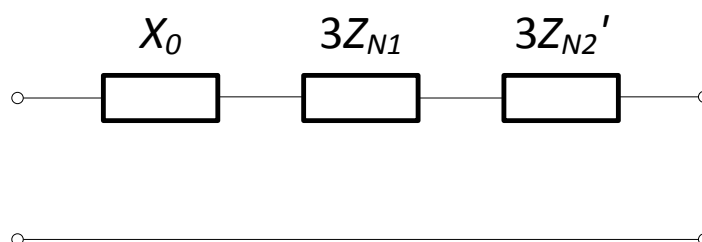


S obje posredno uzemljene nul - točke:



X_0	izvedba
$0,8-0,95 X_d$	trostupna jezgra
$X_0 = X_d$	3 odvojene jednofazne jezgre
$X_0 = X_d$	peterostupna jezgra

Nadomjesna shema:

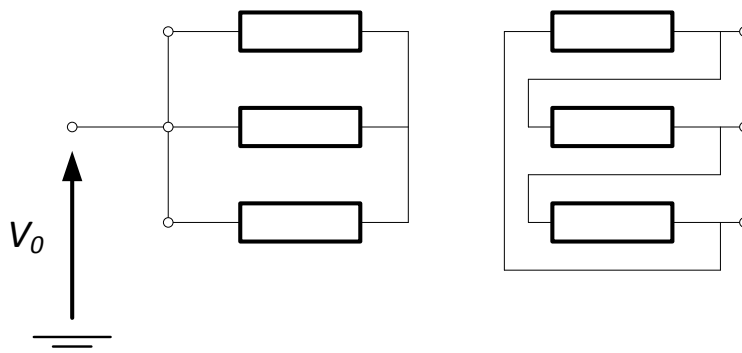


Impendancija Z_{N2} preračunata na napon U_{n1} :

$$Z_{N2}' = Z_{N2} \cdot \left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right)^2$$

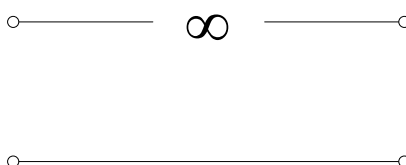
Zvijezda – trokut spoj (Yd)

S neuzemljenim zvjezdištem:

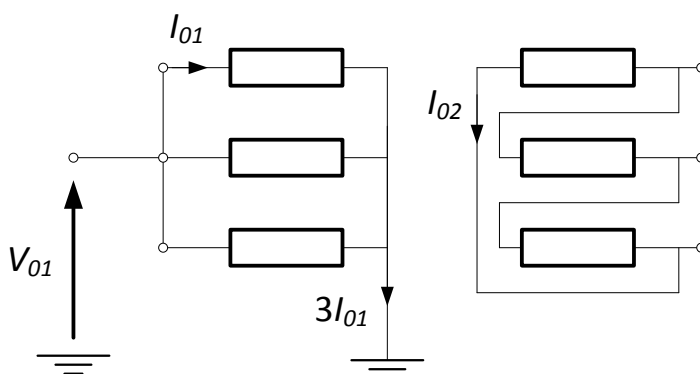


Bez obzira s koje strane narinuli 3 istofazna izmjenična napona, struje namotima ne mogu poteći, jer im je zbroj zbog njihove istofaznosti veći od nule pa je i nulta nadomjesna shema ovog transformatora:

$$X_{01} = X_{02} = \infty$$



S neposredno uzemljenim zvjezdištem:



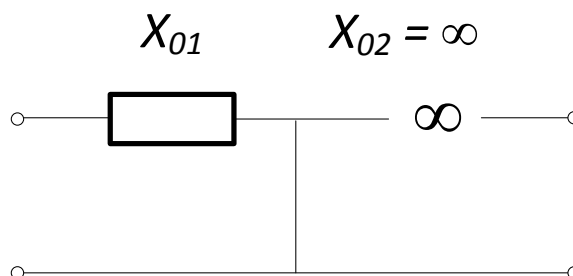
Za narinuti sustav od 3 istofazna napona na sekundarnu stranu, niti jednim namotom ne teku struje, jer nulte struje na mogu prodrijeti u namot spojen u trokut pa je sa te strane $X_0 = \infty$.

Ako s primarne strane narinemo takav sustav od 3 istofazna izmjenična napona, u oba namota će se pojaviti struje. Međutim (isto kao u slučaju YNyn spoja) X_0 će biti u slučaju trostupne jezgre transformatora, zbog realno manjeg $X_m = 1-5 X_d$ (jer se Φ_0 zatvara zrakom zbog istofaznosti struja primara), nešto manji od X_d (0,8-0,95 X_d). U slučaju peterostupne jezgre ili u slučaju kada imamo 3

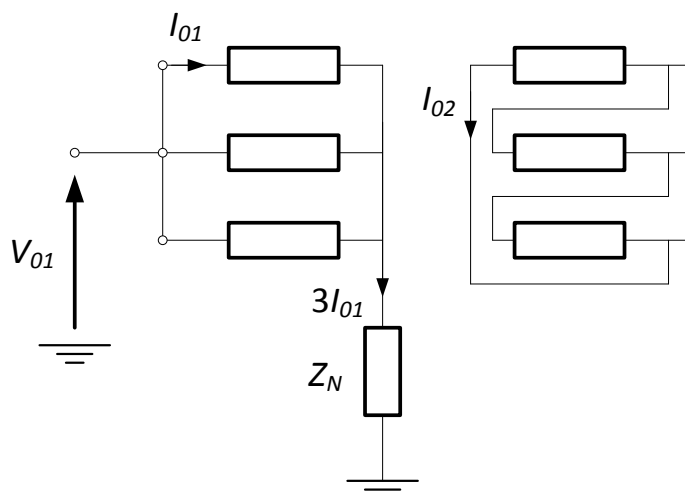
jednofazna transformatora spojena u zvijezdu može se reći da je $X_0 = X_d$ (prilike u transformatoru su gotovo identične prilikama u slučaju normalnog pogona ili pokusa KS-a).

X_0	izvedba
$0,8-0,95 X_d$	trostupna jezgra
$X_0 = X_d$	3 odvojene jednofazne jezgre
$X_0 = X_d$	peterostupna jezgra

Nadomjesna shema:

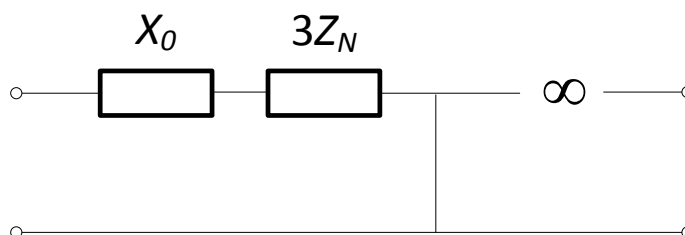


S posredno uzemljenim zvjezdishem:

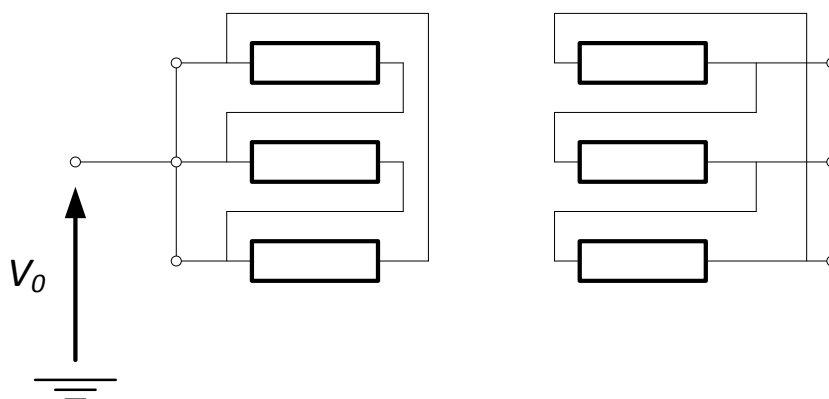


X_0	izvedba
$0,8-0,95 X_d$	trostupna jezgra
$X_0 = X_d$	3 odvojene jednofazne jezgre
$X_0 = X_d$	peterostupna jezgra

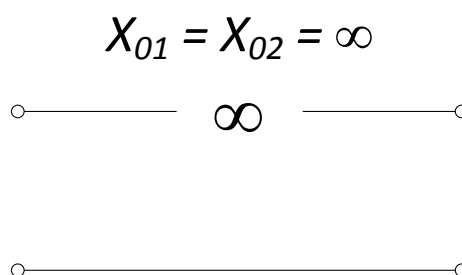
Nadomjesna shema:



Trokut – trokut spoj (Dd)

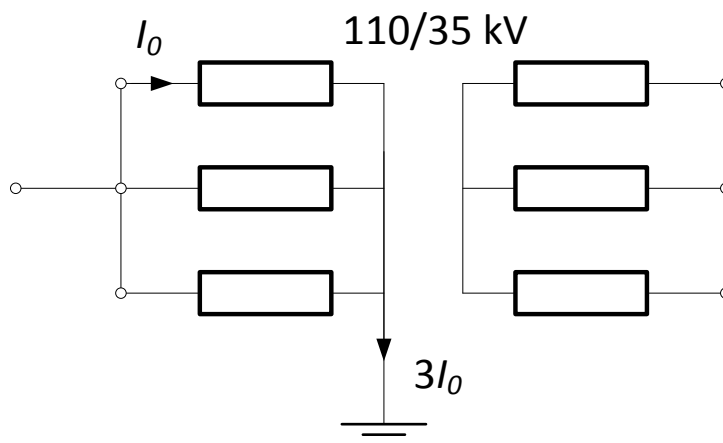


Bez obzira s koje strane narinuli sustav od 3 istofazna napona, istofazne struje koje bi on proizveo neće prodrijeti u namot spojen na trokut pa je nadomjesna shema slijedeća:



9. Primjer – Odrediti reaktancije transformatora u spoju YNy s direktno uzemljenom nul – točkom na visokonaponskoj strani. Prijenosni omjer je 110/35 kV, nazivna snaga 20 MVA, $u_{k\%} = 10\%$. Transformator ima trostupnu jezgru.

Rješenje:



a) **VN strana:**

$$U_{n1} = U_n = 110 \text{ kV}$$

$$X_{dt} = X_{it} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10}{100} \cdot \frac{110^2}{20} = 60,5 \, \Omega$$

$$X_{0t} \cong 5 \cdot X_{dt} = 5 \cdot 60,5 \cong 300 \, \Omega$$

(Za trostupnu jezgru je $X_0 = 4-5 X_d$)

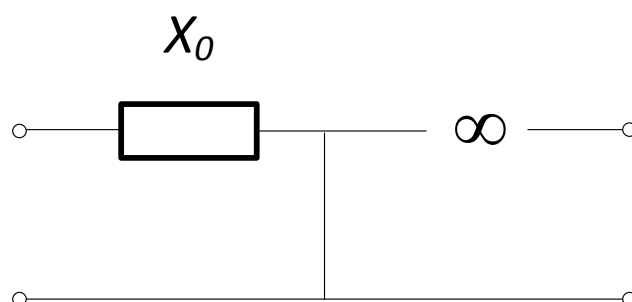
b) **NN strana:**

$$U_{n2} = U_n = 35 \text{ kV}$$

$$X_{dt} = X_{it} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} = \frac{10}{100} \cdot \frac{35^2}{20} = 6,125 \, \Omega$$

$$X_{0t} = \infty$$

Nadomjesna nulta shema transformatora:



6. Ekvivalentne sheme tronamotnih transformatora

Direktna reaktancija tronamotnog transformatora

Za tronamotne transformatore se redovito zadaju slijedeći podaci:

npr. 220/110/35 kV; 75/60/25 MVA

što znači da je između namota:

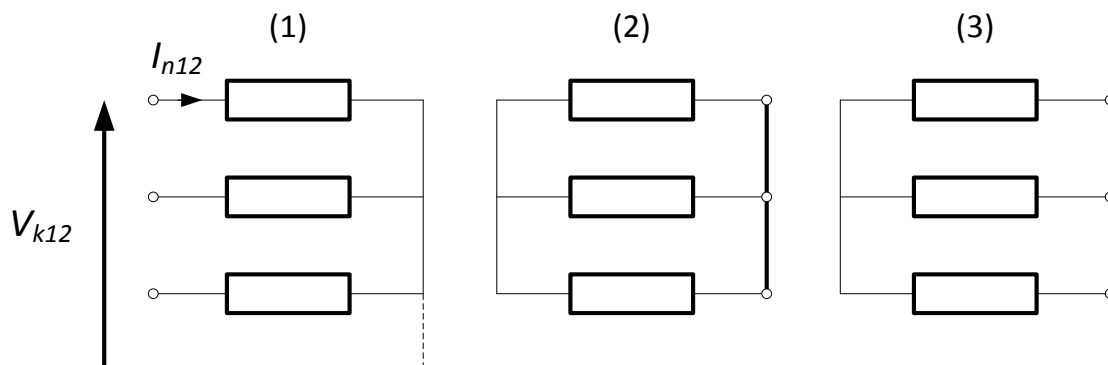
- a) 220 i 110 kV moguće prenijeti snagu $S_{n12} = 60$ MVA;
- b) 220 i 35 kV moguće prenijeti snagu $S_{n13} = 25$ MVA;
- c) 110 i 35 kV moguće prenijeti snagu $S_{n23} = 25$ MVA;

Nazivna snaga namota 220 kV (75 MVA) predstavlja rezultat analize rada transformatora s istodobnim opterećenjem 110 i 35 kV namota.

Direktne reaktancije tronamotnog transformatora određuju se iz 3 pokusa kratkog spoja koji su prikazani na slijedećim shemama. Pri svakom pokusu na jedan se namot narine trofazni napon, drugi je namot kretko spojen, a treći otvoren.

Pokus 1

Trofazni napon se narine na namot (1), namot (2) je kratko spojen, a namot (3) ostaje otvoren.



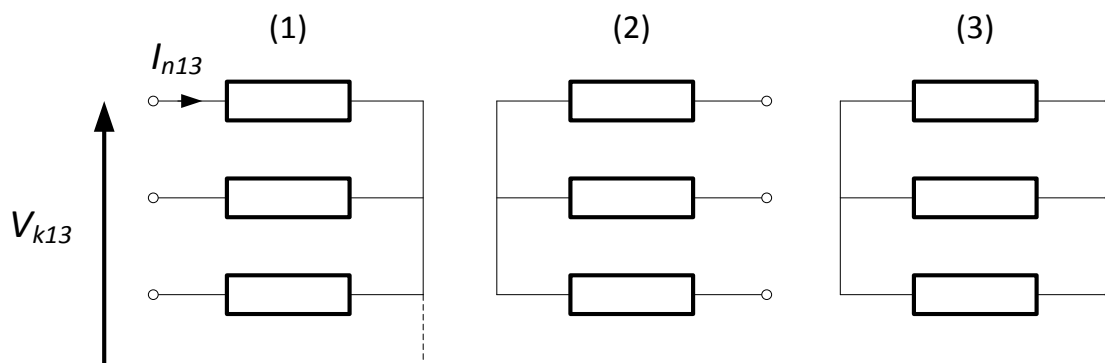
Napon narinut na namot (1) treba povećavati sve dok struja tog namota ne postigne vrijednost I_{n12} koja odgovara nazivnoj snazi transformacije među namotima (1) i (2), S_{n12} .

Pokusom se odredi reaktancija X_{d12} :

$$X_{d12} = \frac{V_{k12}}{I_{n12}}$$

Pokus 2

Trofazni napon se narine na namot (1), namot (3) je kratko spojen, a namot (2) ostaje otvoren.



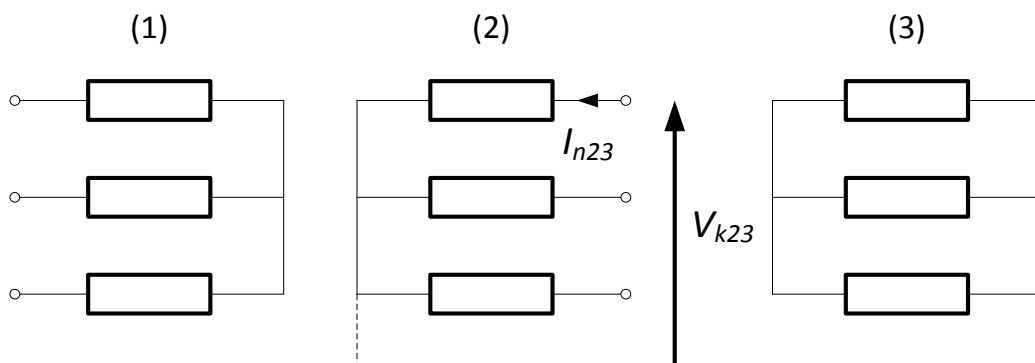
Napon narinut na namot (1) treba povećavati sve dok struja tog namota ne postigne vrijednost I_{n13} koja odgovara nazivnoj snazi transformacije među namotima (1) i (3), S_{n13} .

Pokusom se odredi reaktancija X_{d13} :

$$X_{d13} = \frac{V_{k13}}{I_{n13}}$$

Pokus 3

Trofazni napon se narine na namot (2), namot (3) je kratko spojen, a namot (1) ostaje otvoren.



Napon narinut na namot (2) treba povećavati sve dok struja tog namota ne postigne vrijednost I_{n23} koja odgovara nazivnoj snazi transformacije među namotima (2) i (3), S_{n23} .

Pokusom se odredi reaktancija X_{d23} :

$$X_{d23} = \frac{V_{k23}}{I_{n23}}$$

Relativni naponi kratkog spoja su redovito zadani za transformator, u_{k12} , u_{k13} , u_{k23} uz S_{n12} , S_{n13} , S_{n23} .

$$u_{k12} = \frac{V_{k12}}{V_{n1}} = \frac{U_{k12}}{U_{n1}}$$

$$u_{k13} = \frac{V_{k13}}{V_{n1}} = \frac{U_{k13}}{U_{n1}}$$

$$u_{k23} = \frac{V_{k23}}{V_{n2}} = \frac{U_{k23}}{U_{n2}}$$

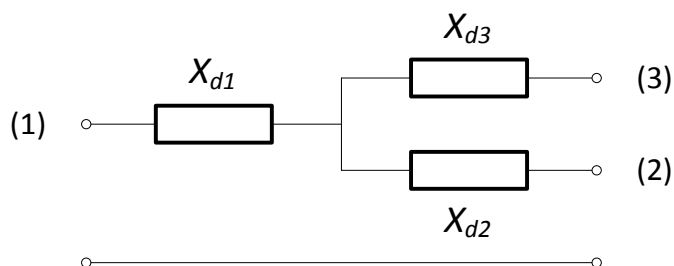
Sve se reaktancije transformatora proračunavaju za isti, **bazni napon, U_b** :

$$X_{d12} = u_{k12} \cdot \frac{U_b^2}{S_{n12}}$$

$$X_{d13} = u_{k13} \cdot \frac{U_b^2}{S_{n13}}$$

$$X_{d23} = u_{k23} \cdot \frac{U_b^2}{S_{n23}}$$

Ekvivalentna shema tronamotnog transformatora u direktnom sustavu redovito se crta s 3 reaktancije, X_{d1} , X_{d2} i X_{d3} spojene u zvijezdu:



Kako za pokuse kratkog spoja (1, 2 i 3) vrijedi:

$$X_{d12} = X_{d1} + X_{d2}$$

$$X_{d13} = X_{d1} + X_{d3}$$

$$X_{d23} = X_{d2} + X_{d3}$$

to se onda sve tri reaktancije u ekvivalentnoj shemi dobivaju iz slijedećih jednadžbi:

$$X_{d1} = \frac{1}{2}(X_{d12} + X_{d13} - X_{d23})$$

$$X_{d2} = \frac{1}{2}(X_{d12} + X_{d23} - X_{d13})$$

$$X_{d3} = \frac{1}{2}(X_{d13} + X_{d23} - X_{d12}).$$

Ako se iz prethodnih relacija dobije koja od reaktancija X_{d1} , X_{d2} i X_{d3} negativna nije se potrebno zabrinjavati, već je potrebno s njima dalje provoditi račun, budući da su te reaktancije, za razliku od stvarnih, fizikalno utemeljenih reaktancija X_{d12} , X_{d13} i X_{d23} , računske veličine.

Inverzna reaktancija tronamotnog transformatora

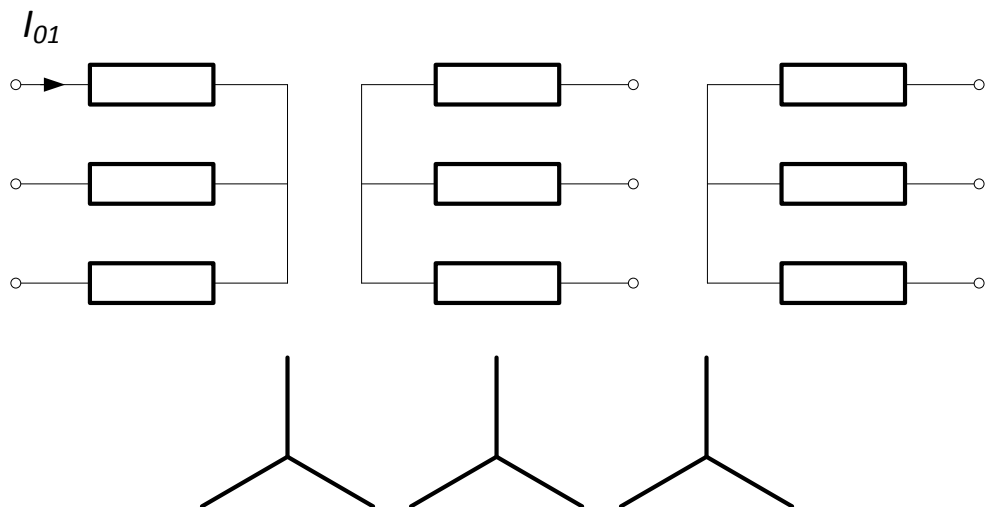
Nadomjesna shema tronamotnog transformatora u inverznom sustavu napona jednaka je onoj u direktnom, budući da se radi o elementu mreže bez rotacionih dijelova (naime, zamjenom dvije faze u prethodno opisanim pokusima KS-a, prilike u namotima i magnetskom krugu se ne mijenjaju).

Nulta reaktancija tronamotnog transformatora

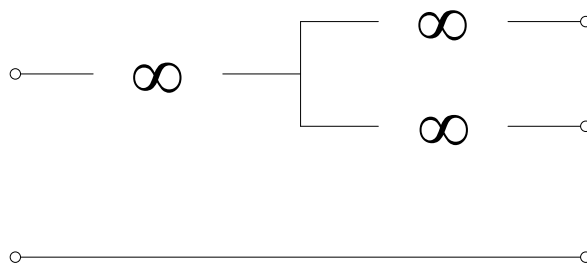
Nulta reaktancija tronamotnog transformatora (kao i dvonamotnog) ovisi o:

- izvedbi
- spoju namota
- uzemljenju nul - točke transformatora

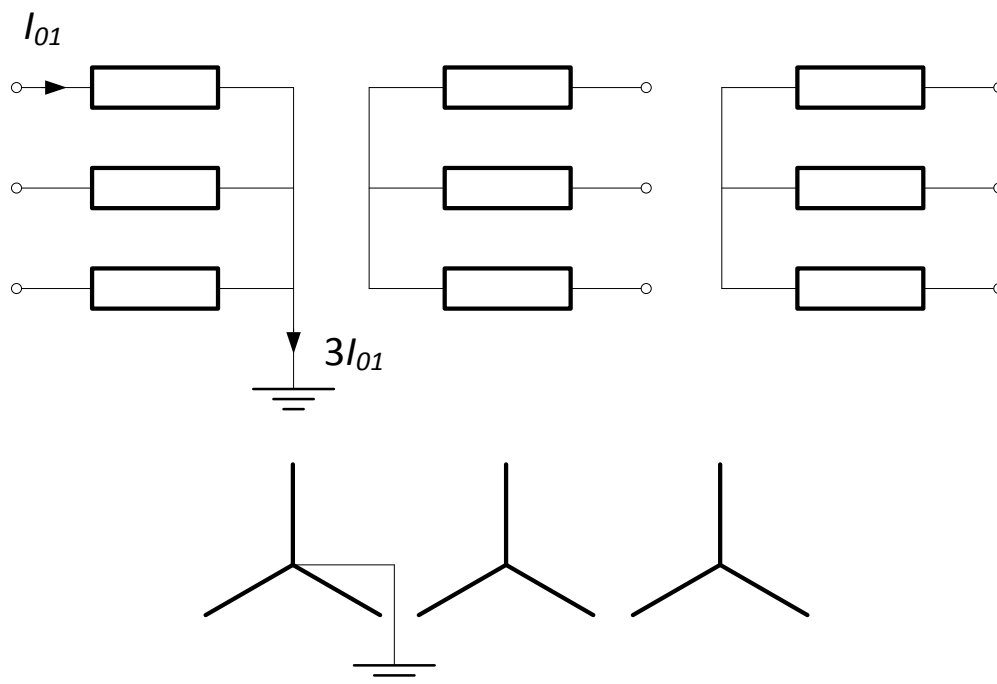
(Yyy spoj) Nul – točke svih triju namota izolirane



Ako na bilo koji od namota narinemo nulti sustav napona, niti u jednom namotu neće se moći pojaviti nulte struje zbog čega je nulta nadomjesna shema ovog transformatora:

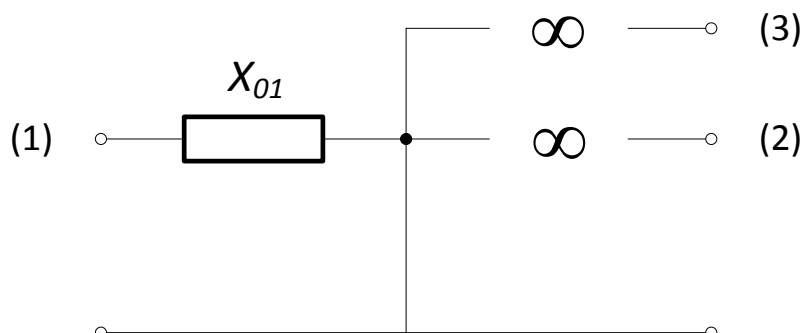


(Yyy spoj) Neposredno uzemljena nul – točka jednog namota

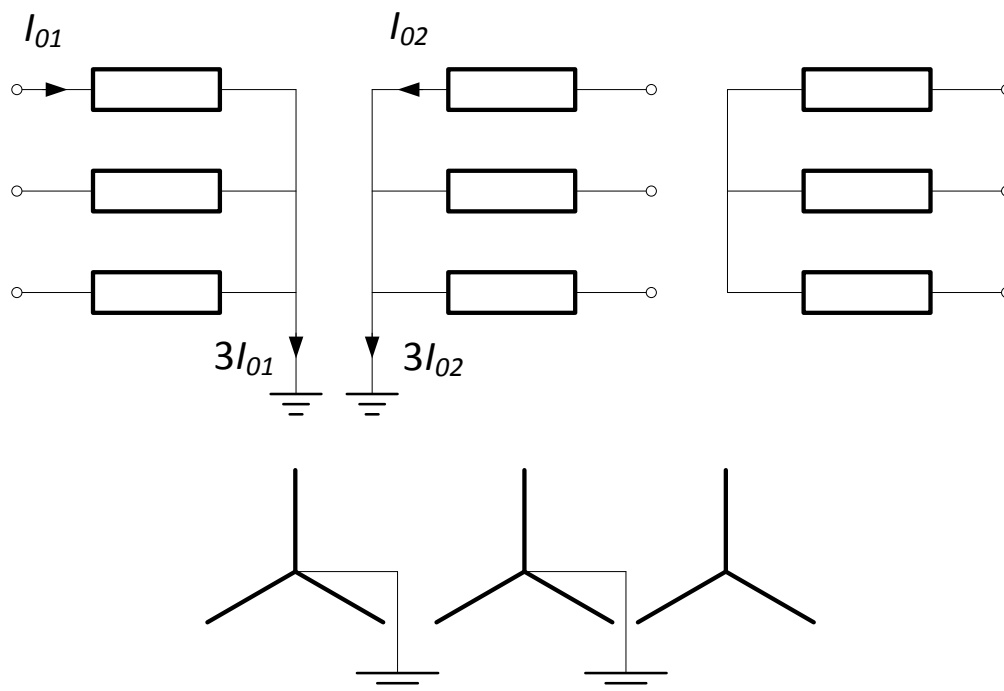


Ako narinemo nulti sustav napona na namot (1), u njemu će se pojaviti nulti sustav struja koje će se zatvoriti kroz uzemljenje namota (1). U ostalim namotima neće biti struja. Magnetski tokovi Φ_0 koje uzrokuju te struje zatvoriti će se u slučaju trostupne jezgre kroz zrak (pa je nulta reaktancija $X_{o1} \ll X_m$), a u slučaju peterostupne jezgre ili 3 jezgre koje odgovaraju trima jednofaznim transformatorima koji zajedno rade kao trofazni, zatvoriti će se kroz željezo (pa je $X_{o1} = X_m$). Dakle, nulta reaktancija tronamotnog transformatora X_{o1} ovisi o izvedbi transformatora.

Kako se u slučaju narinutog nultog sustava napona na namote (2) i (3) ne može niti u jednom namotu pojaviti struja, to je onda nadomjesna shema ovog transformatora u nultom sustavu:

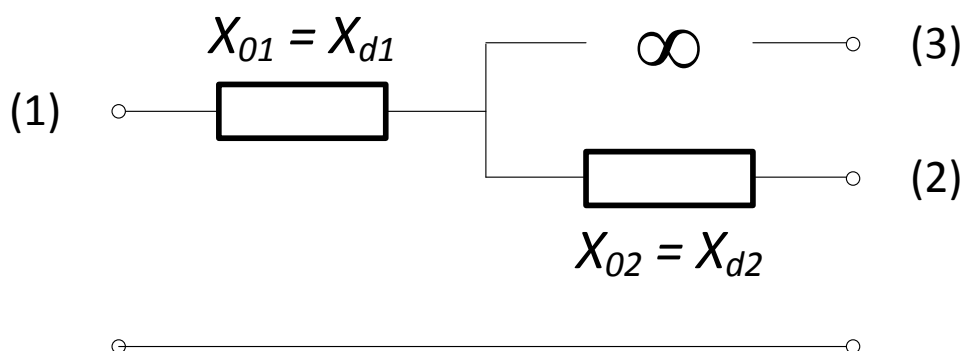


(Yyy spoj) Neposredno uzemljene nul – točke dva namota

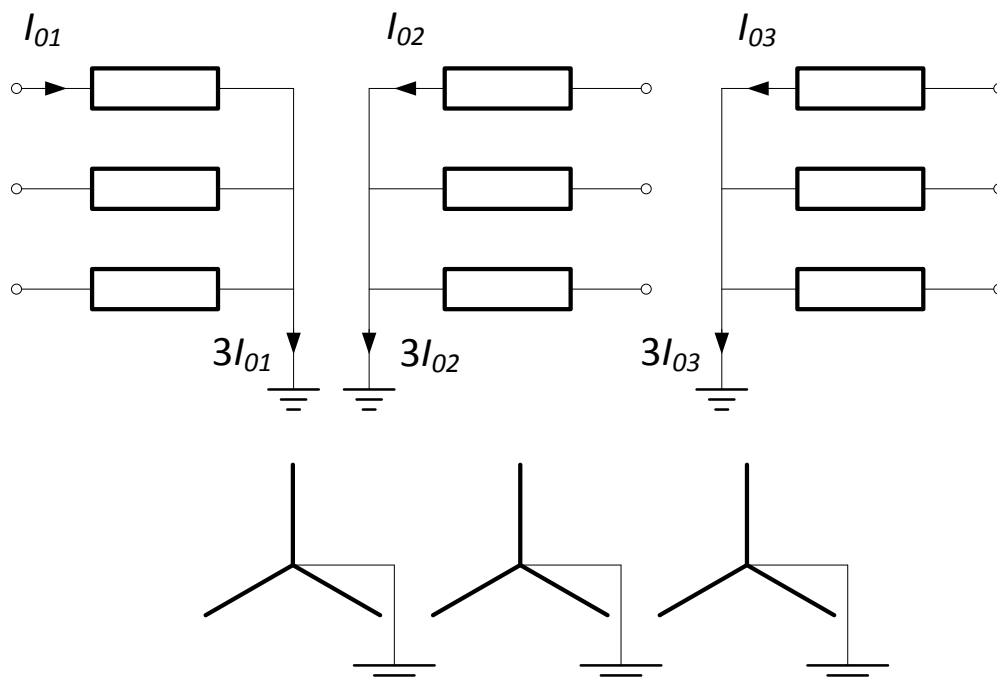


Ako narinemo nulti sustav napona na bilo koji od namota (1) iil (2), onda će se u oba namota pojaviti nulti sustav struja. Prilike u krugu su slične onima u normalnom pogonu, ako je jezgra trostupna (jer se Φ_0 magnetski tok struje magnetiziranja mora zatvarati zrakom zbog istofaznosti Φ_0 svih faza pa je $X_{012} \leq X_{d12}$), a identične onima u normalnom pogonu, ako je riječ o peterostupnoj jezgri ili ako se radi o tri odvojene jezgre jednofaznih transformatora.

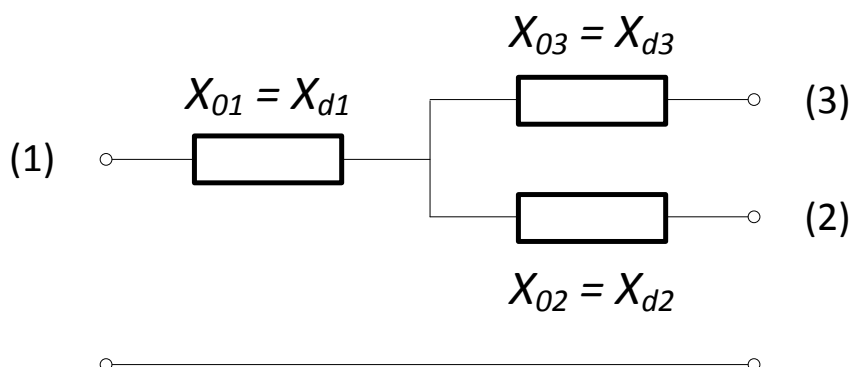
Ako narinemo nulti sustav napona na namot (3), niti u jednom namotu neće biti struja pa je onda nadomjesna shema ovog transformatora u nultom sustavu:



(Yyy spoj) Neposredno uzemljene nul – točke sva tri namota

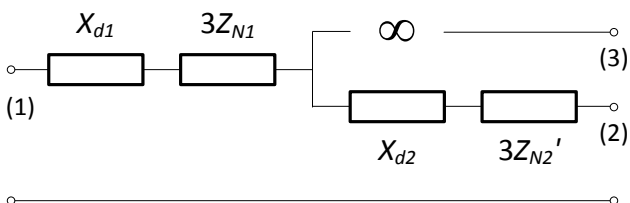
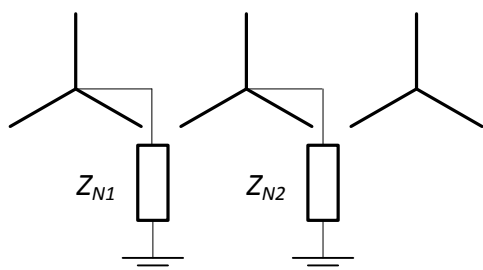
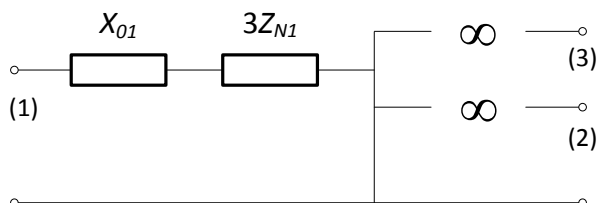
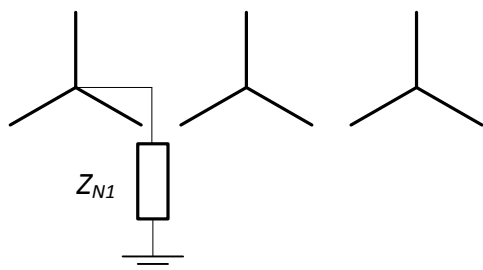


Ako narinemo nulti sustav napona na bilo koji od namota onda su prilike u krugu (zbog mogućnosti zatvaranja nultih struja u svim namotima) gotovo jednake onima u normalnom pogonu, odnosno onima u slučajevima kratkih spojeva (realno gledajući za trostupnu jezgru se malo razlikuju).

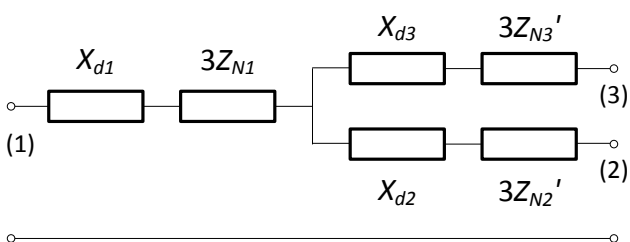
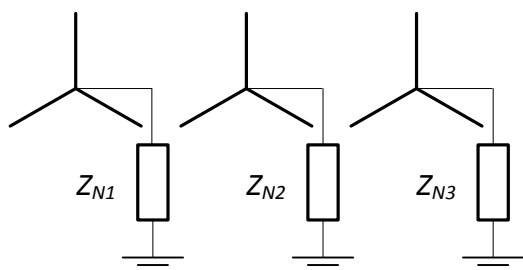


(Yyy spoj) Posredno uzemljenje nul – točka

Ako se u prethodnim slučajevima gdje je riječ o neposrednom uzemljenju, nul – točke transformatora uzemljuju posredno preko neke impedancije, tada su nadomjesne sheme slijedeće:

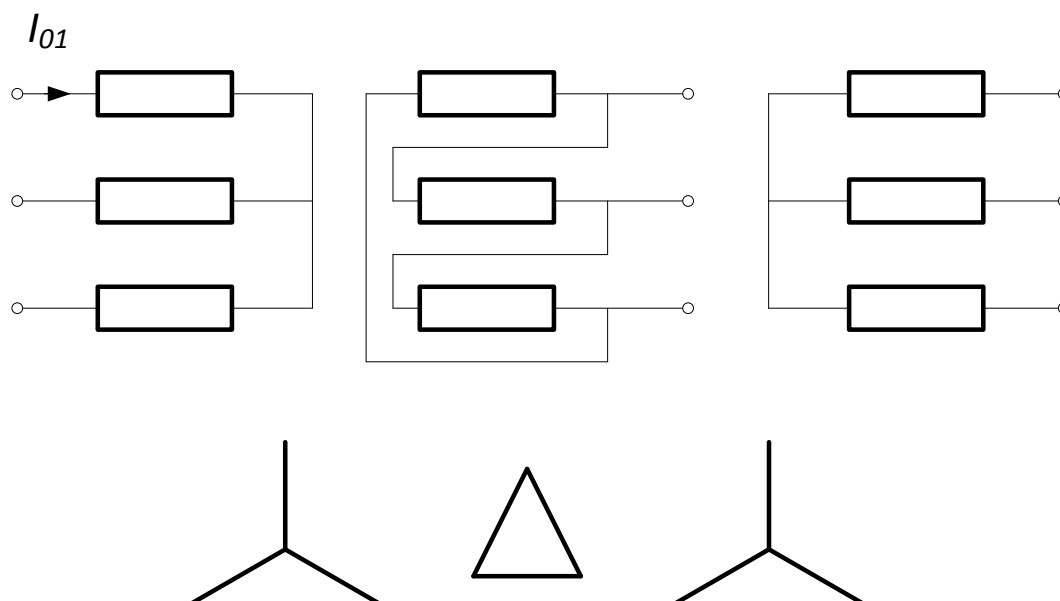


$$Z_{N2}' = Z_{N2} \cdot \left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right)^2$$

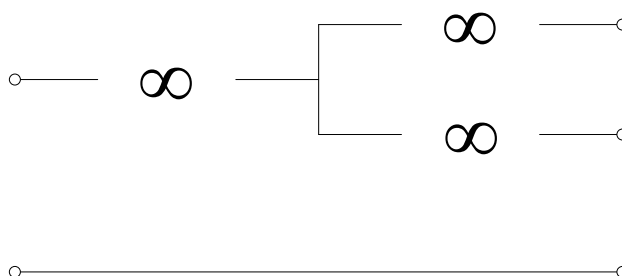


$$Z_{N2}' = Z_{N2} \cdot \left(\frac{U_{n1}}{U_{n2}} \right)^2 \quad Z_{N3}' = Z_{N3} \cdot \left(\frac{U_{n1}}{U_{n3}} \right)^2$$

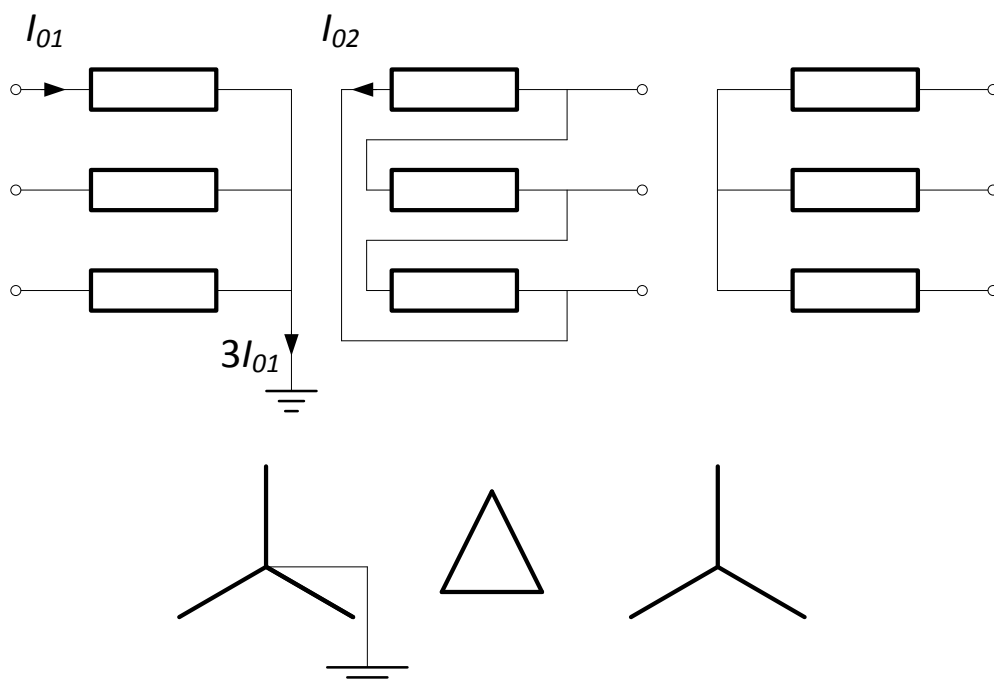
(YΔy spoj) Nul – točke oba zvijezda namota izolirane



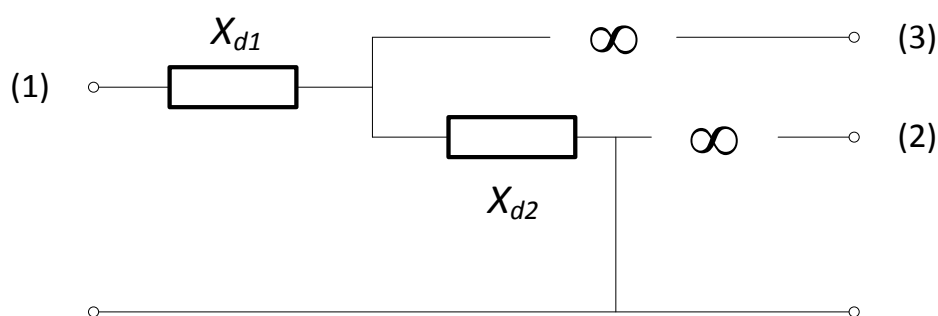
Ako na bilo koji namot narinemo nulti sustav napona, niti u jednom od njih neće se pojaviti struje pa je onda nadomjesna shema ovog transformatora u nultom sustavu:



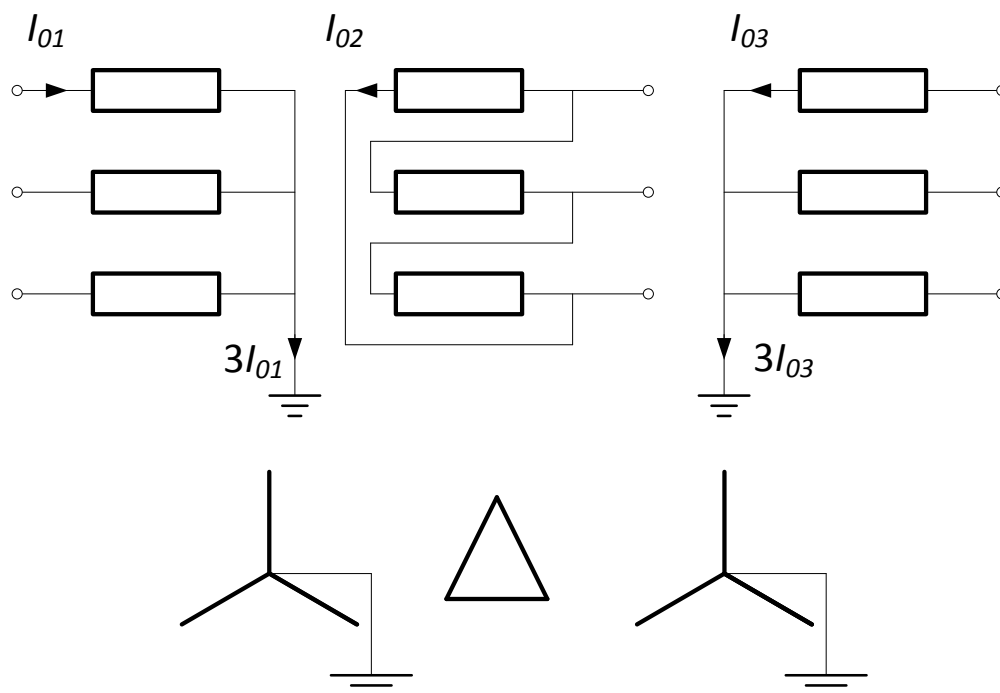
(YΔy spoj) Nul – točka jednog zvijezda namota neposredno uzemljena



Ako na namot (1) priključimo nulti sustav napona, prilike su u krugu (za trostupnu jezgru) gotovo identične onima u slučaju kratkog spoja namota (2) za namot (3) u praznom hodu. Ako na namote (2) ili (3) narinemo isti nulti sustav napona, niti u jednome drugom namotu se neće pojaviti nulte struje pa je onda nadomjesna shema ovog transformatora u nultom sustavu:

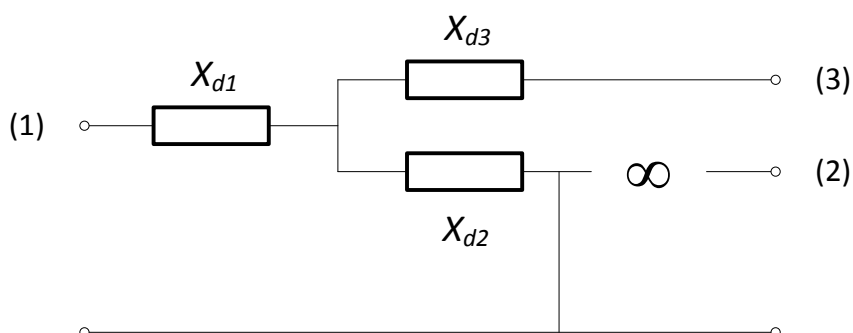


(YΔy spoj) Nul – točke oba zvijezda namota neposredno uzemljena

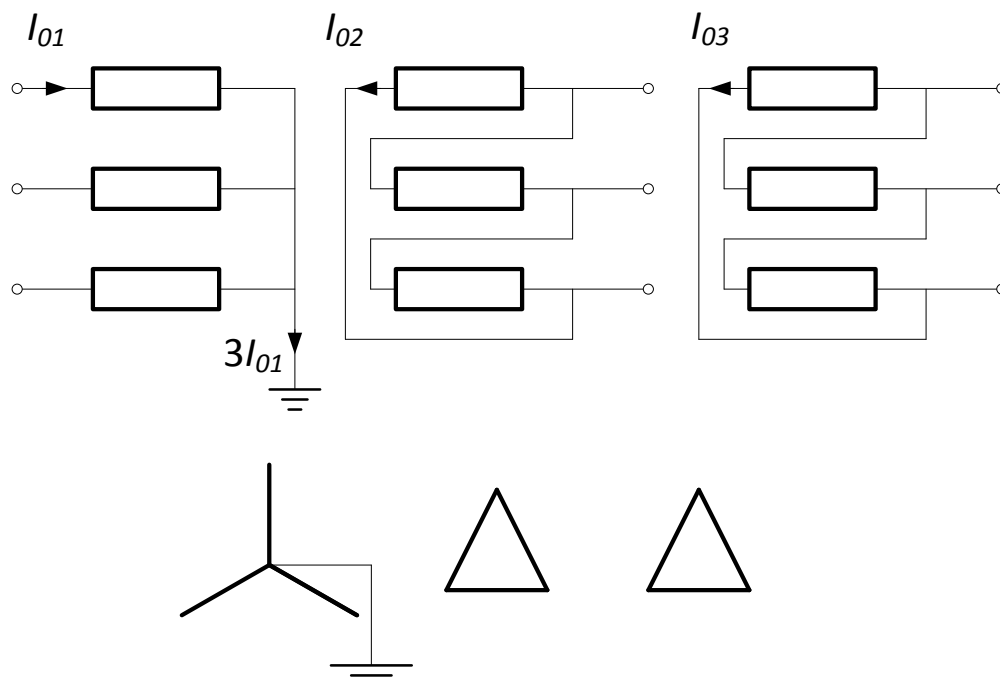


Ako na namot (2) priključimo nulti sustav napona, neće se niti u jednom namotu pojaviti struje. Ako na namote (1) ili (3) narinemo nulti sustav napona, reaktancije odgovaraju direktnim reaktancijama između namota.

Nadomjesna shema ovog transformatora u nultom sustavu je:

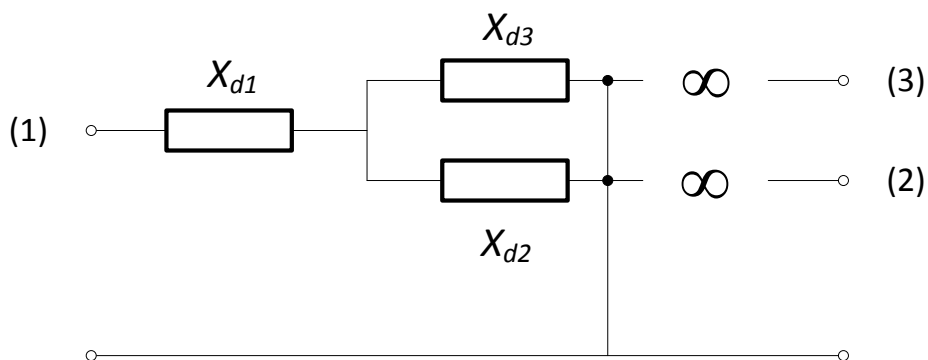


(YΔΔ spoj) Nul – točka zvijezda namota neposredno uzemljena

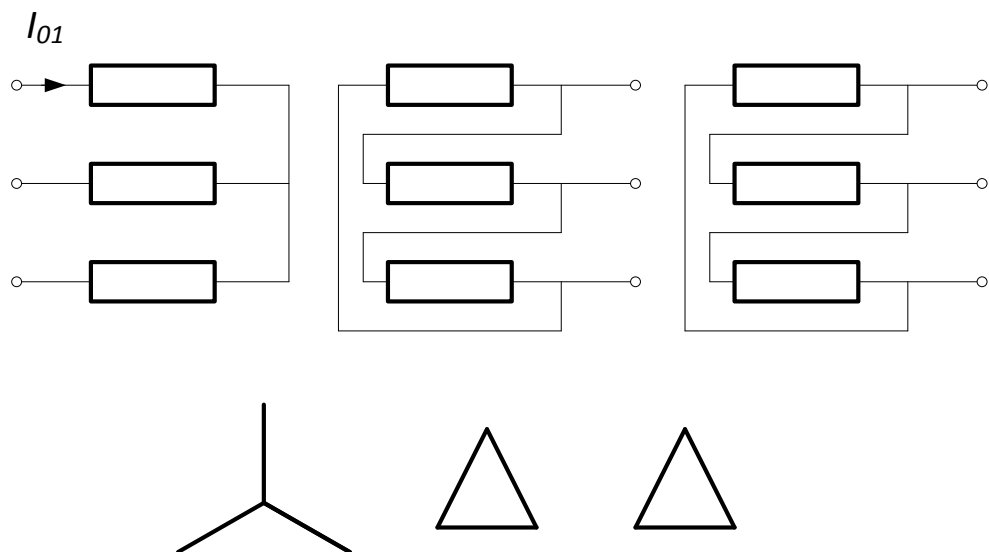


Ako na namot (2) ili (3) narinemo nulti sustav napona, u niti jednom namotu neće poteći struje, no, ako nulti sustav napona narinemo na namot (1), dobivamo reaktanciju koja odgovara direktnoj zbog pojave nultih struja u svim namotima, uslijed čega su prilike identične onima u slučaju trofaznog kratkog spoja.

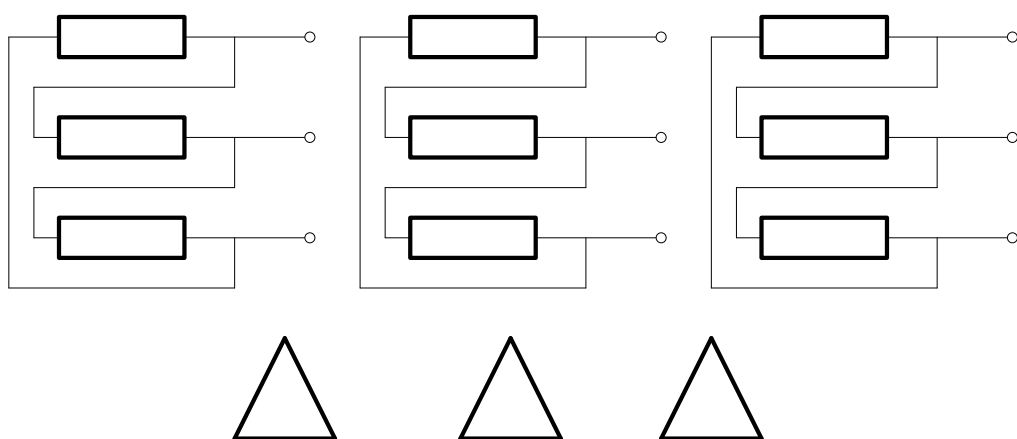
Nadomjesna shema ovog transformatora u nultom sustavu je:



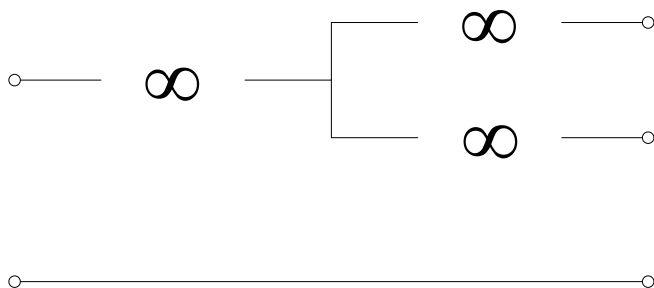
(YΔΔ spoj) Nul – točka zvijezda namota izolirana



ΔΔΔ spoj



Ako na bilo koji namot u ova dva spoja narinemo nulti sustav napona, niti u jednom od njih neće se pojaviti struje pa su onda nadomjesne sheme ovih transformatora u nultom sustavu identične i izgledaju ovako:



10. Primjer – Odrediti reaktancije u ekvivalentnoj shemi spoja tronamotnog transformatora $\Delta Y_0 y_5$, 110/35/10 kV, nazivnih snaga 40/20/20 MVA.

$$u_{k12\%} = 10\% \text{ za } 20 \text{ MVA} = S_{n12}$$

$$u_{k13\%} = 8\% \text{ za } 20 \text{ MVA} = S_{n13}$$

$$u_{k23\%} = 20\% \text{ za } 20 \text{ MVA} = S_{n23}$$

Rješenje:

Sve reaktancije proračunat ćemo za bazni napon 110 kV = U_b

$$X_{d12} = \frac{u_{k12\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_{n12}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{110^2}{20} = 60,5 \, \Omega$$

$$X_{d13} = \frac{u_{k13\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_{n13}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{110^2}{20} = 48,4 \, \Omega$$

$$X_{d23} = \frac{u_{k23\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_{n23}} = \frac{20}{100} \cdot \frac{110^2}{20} = 121,0 \, \Omega$$

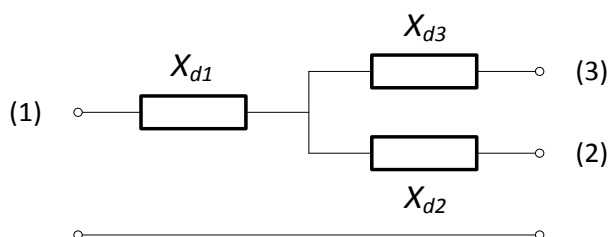
$$X_{d1} = \frac{1}{2}(X_{d12} + X_{d13} - X_{d23}) = \frac{1}{2}(60,5 + 48,4 - 121,0) = -6,05 \, \Omega$$

$$X_{d2} = \frac{1}{2}(X_{d12} + X_{d23} - X_{d13}) = \frac{1}{2}(60,5 + 121,0 - 48,4) = 66,55 \, \Omega$$

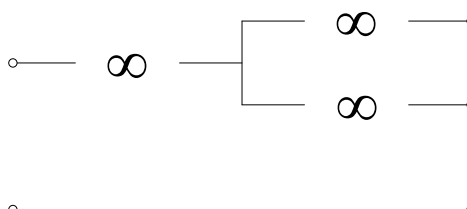
$$X_{d3} = \frac{1}{2}(X_{d13} + X_{d23} - X_{d12}) = \frac{1}{2}(48,4 + 121,0 - 60,5) = 54,45 \, \Omega$$

Nadomjesne sheme:

Direktni i inverzni sustav



Nulti sustav



Budući da je riječ o spoju ΔY bez izolirane obje nul – točke zvijezda namota to su onda nadomjesne reaktancije u nultom sustavu neizmjerne velike.

11. Primjer – Za tronomotni transformator 220/110/10 kV, nazivnih snaga 90/60/30 MVA i napona kratkog spoja:

$$u_{k12\%} = 10\% \text{ za } 60 \text{ MVA} = S_{n12}$$

$$u_{k13\%} = 6\% \text{ za } 30 \text{ MVA} = S_{n13}$$

$$u_{k23\%} = 4\% \text{ za } 30 \text{ MVA} = S_{n23}$$

odredite nadomjesnu shemu direktnog i nultog sustava. Transformator je grupe spoja Yyd, a oba su zvjezdišta uzemljena preko reaktancija $Z_{N1} = Z_{N2} = j2 \Omega$.

Rješenje:

Sve reaktancije proračunat ćemo za bazni napon 220 kV = U_b

$$X_{d12} = \frac{u_{k12\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_{n12}} = \frac{10}{100} \cdot \frac{220^2}{60} = 80,67 \Omega$$

$$X_{d13} = \frac{u_{k13\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_{n13}} = \frac{6}{100} \cdot \frac{220^2}{30} = 96,8 \Omega$$

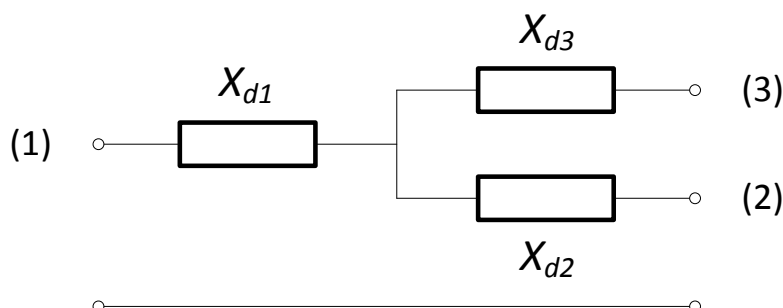
$$X_{d23} = \frac{u_{k23\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_{n23}} = \frac{4}{100} \cdot \frac{220^2}{30} = 64,53 \Omega$$

$$X_{d1} = \frac{1}{2}(X_{d12} + X_{d13} - X_{d23}) = \frac{1}{2}(80,67 + 96,8 - 64,53) = 56,47 \Omega$$

$$X_{d2} = \frac{1}{2}(X_{d12} + X_{d23} - X_{d13}) = \frac{1}{2}(80,67 + 64,53 - 96,8) = 24,2 \Omega$$

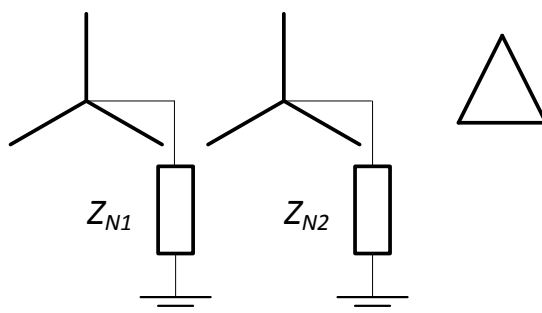
$$X_{d3} = \frac{1}{2}(X_{d13} + X_{d23} - X_{d12}) = \frac{1}{2}(96,8 + 64,53 - 80,67) = 40,33 \Omega$$

Nadomjesna shema direktnog i inverznog sustava:

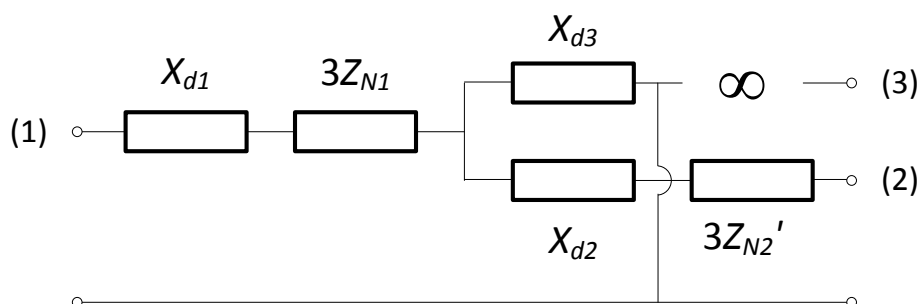


Nadomjesna shema nultog sustava:

Simbolički se ovaj tronamotni transformator može prikazati na slijedeći način:



Stoga nadomjesna shema ovakvog transformatora u nultom sustavu izgleda kao na slijedećoj slici:



Pri tome je:

$$3Z_{N1} = 3 \cdot j2 = j6 \, \Omega$$

$$3Z_{N2}' = 3Z_{N2} \cdot \left(\frac{U_b}{U_{n2}} \right)^2 = 3 \cdot j2 \cdot \left(\frac{220}{110} \right)^2 = j24 \, \Omega.$$

7. Reaktancije vodova i kabela

Zračni vodovi

Direktna reaktancija (omski otpor se zanemaruje jer je za SN i VN $R \ll X$ što ne vrijedi i za NN zračne vodove)

Direktna reaktancija zračnog voda odgovara reaktanciji faznog vodiča trofaznog voda. Reaktancija faznog vodiča voda ovisi o međusobnom geometrijskom rasporedu vodiča (podsjetnik: induktivitet i međusobni kapacitet faznih vodiča ovise o promjeru vodiča te o međusobnim udaljenostima kao i o eventualno korištenom preplitanju faza voda – metoda SGU) te o presjeku vodiča. Za naše proračune dovoljno je vršiti proračune s približnim vrijednostima reaktancija voda pa je tako u literaturi⁵ dan dijagram iz kojeg je moguće očitati direktnu reaktanciju zračnog voda u ovisnosti o nazivnom naponu te o presjeku zračnog voda.

U približnim proračunima se uzima da je:

$$X_d = 0,4 \, \Omega/\text{km} \text{ za } U_n > 30 \text{ kV}$$
$$X_d = 0,35 \, \Omega/\text{km} \text{ za } U_n \leq 30 \text{ kV}.$$

Inverzna reaktancija

Budući da nema razlike teku li kroz vod struje direktnog ili inverznog trofaznog sustava, to je onda inverzna reaktancija zračnog voda jednaka direktnoj, odnosno $X_i = X_d$.

Nulta reaktancija

Nulta reaktancija zračnog voda ovisi o:

- 1) presjeku vodiča voda
- 2) međusobnom geometrijskom rasporedu vodiča voda
- 3) postojanju zaštitnog užeta (ono je uzemljeno i služi za zaštitu voda od udara groma i u biti povećava dozemni kapacitet voda koji je interesantan kod nultog sustava napona i struja)
- 4) vodljivosti tla

U literaturi⁶ je dan dijagram iz kojeg je moguće očitati nulte reaktancije zračnih vodova ovisno o presjeku faznih vodiča voda, nazivnom naponu voda i vodljivosti tla.

Napomena: Iako mi realno u našim proračunima zanemarujemo djelatne otpore, u slučaju kada bi se oni uračunavali nulti djelatni otpor bi se sastojao od djelatnog otpora vodiča povećanog za 0,15 Ω/km zbog otpora tla kojim se zatvaraju nulte komponente struja.

⁵ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 102, slika 2.58

⁶ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 103, slika 2.59

Kabeli

Direktna i inverzna reaktancija kabela (djelatni otpor se u VN i SN zanemaruje)

Stvarne vrijednosti direktnih, inverznih i nultih reaktancija kabela mogu se utvrditi mjerenjem. Tako su u literaturi⁷ dane vrijednosti direktnih i inverznih reaktancija kabela za razne izvedbe i nazivne napone te presjeke kabela.

Nulta reaktancija kabela

Nultu reaktanciju kabela je također moguće pronaći u literaturi⁸.

Goli profilni vodiči

Oni spajaju pojedine dijelove rasklopnog postrojenja/elektrane. Približno se može računati da je reaktancija takvih profilnih golih vodiča 0,15 Ω/km. Točniji podaci o reaktancijama spojnih vodiča pravokutnog profila dani su u literaturi⁹.

12. Primjer – Odredite direktnu i nultu reaktanciju zračnog voda bez zaštitnog užeta, nazivnog napona 110 kV i presjeka 240 mm² dužine 30 km.

Rješenje:

Prema literaturi¹⁰ za $U_n = 110$ kV i $S = 240$ mm² mogu se očitati slijedeći podaci: $x_{dv} = 0,386$ Ω/km i $x_{iv} = x_{dv} = 0,386$ Ω/km:

$$X_{dv} = x_{dv} \cdot l = 0,386 \cdot 30 = 11,58 \Omega$$

$$X_{iv} = X_{dv} = x_{dv} \cdot l = 0,386 \cdot 30 = 11,58 \Omega$$

Prema literaturi¹¹ za $U_n = 110$ kV i $S = 240$ mm² bez zaštitnog užeta i vodljivosti tla 20 μS/cm (kamenito tlo) može se očitati da je $x_{0v} = 1,55$ Ω/km:

$$x_{0v} = 1,55 \Omega/\text{km}$$

$$X_{0v} = x_{0v} \cdot l = 1,55 \cdot 30 = 46,5 \Omega$$

⁷ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 104/5, slike 2.61 i 2.62

⁸ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 104, tablica 2.4

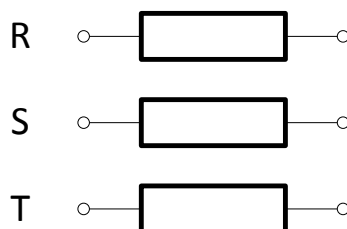
⁹ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 103, slika 2.60

¹⁰ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 102, slika 2.58

¹¹ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 103, slika 2.59 (dijagram)

8. Reaktancije prigušnica

Prigušnice, o kojim je u ovom slučaju riječ, služe za smanjenje struja kratkog spoja i spajaju se u seriju s trošilima. One se izvode kao svici bez željeza; za svaku fazu po jedan svitak, pri čemu su ti svici međusobno odvojeni (Slika 10).



Slika 10

Reaktancije prigušnica određujemo kao i kod transformatora iz pokusa kratkog spoja, što znači da na svitak prigušnice narinemo takav napon V_k da svitkom poteče nazivna struja prigušnice:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n}.$$

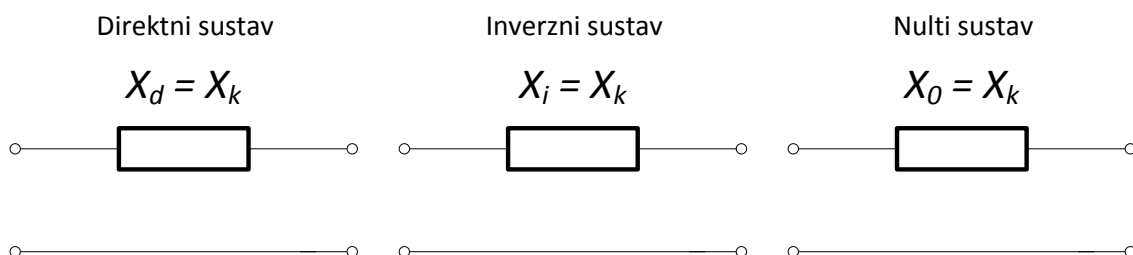
Prema tome je reaktancija svitka jednaka:

$$X_k = \frac{V_k}{I_n}$$

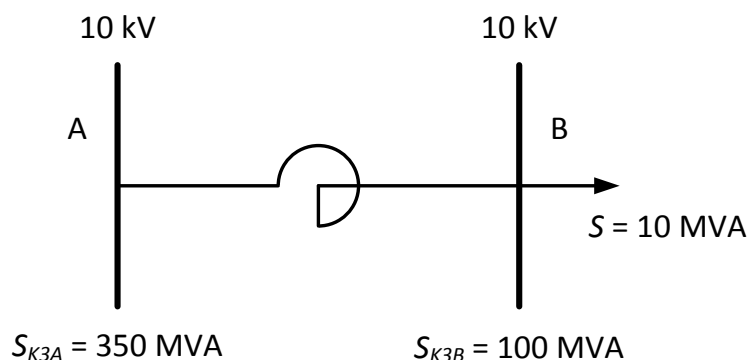
Dok je relativna, postotna vrijednost reaktancije jednaka:

$$\begin{aligned} x_{k\%} &= \frac{V_k}{V_n} \cdot 100 = \frac{X_k \cdot I_n}{V_n} \cdot 100 \\ \Rightarrow \\ X_k &= x_{k\%} \cdot \frac{V_n}{I_n} \cdot \frac{3V_n}{3V_n} \cdot \frac{1}{100} = \frac{x_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \end{aligned}$$

Nadomjesne sheme reaktancija prigušnice po sustavima:



13. Primjer – Odredite induktivni otpor prigušnice za ograničenje struje kratkog spoja u mreži prema slici. Navedite kojim je parametrima opisana ova prigušnica.



Rješenje:

Iz zadanih snaga trofaznog kratkog spoja na sabirnicama A i B moguće je odrediti reaktancije:

X_{dmA}'' – reaktancija mreže do sabirnice A

X_{dmB}'' – reaktancija mreže do sabirnice B

$$X_{dmA}'' = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{K3A}} = \frac{1,1 \cdot 10^2}{350} = 0,3146 \, \Omega$$

$$X_{dmB}'' = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{K3B}} = \frac{1,1 \cdot 10^2}{100} = 1,1 \, \Omega$$

Reaktancija sabirnice računa se kao razlika ovih dvaju reaktancija:

$$X_k = X_{dmB}'' - X_{dmA}'' = 1,1 - 0,3146 = 0,7854 \, \Omega$$

$$x_{k\%} = X_k \cdot \frac{S_n = S}{U_n^2} = 0,7854 \cdot \frac{10}{10^2} = 7,854 \, \%$$

Prigušnica je dakle opisana slijedećim parametrima:

$$\begin{aligned} U_n &= 10 \, \text{kV} \\ S_n &= 10 \, \text{MVA} \\ x_{k\%} &= 7,854 \, \%. \end{aligned}$$

Napomena: Ovdje su uporebljene neke formule koje će se objasniti u daljnjem tekstu.

9. Aktivna trošila

U grupu aktivnih trošila ubrajaju se:

- a) sinkroni motori, sinkroni kompenzatori
- b) asinkroni motori
- c) aktivna mreža

Sinkroni motori i sinkroni kompenzatori

U slučaju kratkog spoja sinkroni motori/kompenzatori se zbog svoje nezavisne uzbude ponašaju kao sinkroni generator što znači da povećavaju struju kratkog spoja. Znači da je općenito sve sinkrone strojeve prilikom proračuna struja kratkog spoja potrebno tretirati kao sinkrone generatore.

Asinkroni motori

Budući da asinkroni motori nemaju uzbudu neovisnu o mreži, njihov udio u struji kratkog spoja traje samo 1-2 periode. To znači da se može smatrati da asinkroni motori imaju samo početnu reaktanciju, X_M'' :

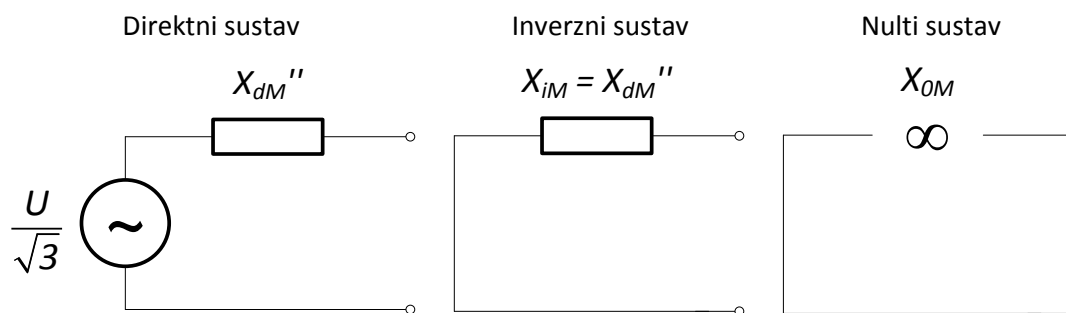
$$X_M'' = \frac{1}{I_p / I_n} \cdot \frac{U_n}{\sqrt{3} \cdot I_n} = \frac{1}{I_p / I_n} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} [\Omega] = X_{dM}''$$

gdje je I_p potezna struja asinkronog motora.

Inverzna reaktancija asinkronog motora identična je direktnoj, $X_{im} = X_{dm}''$.

Nulta reaktancija asinkronog motora ovisi o izvedbi uzemljenja nul – točke. Ako je ona uzemljena, tada je $X_{0m} < X_{dm}'' = X_{im}$, a ako nije uzemljena tada je nulta reaktancija neizmjereno velika.

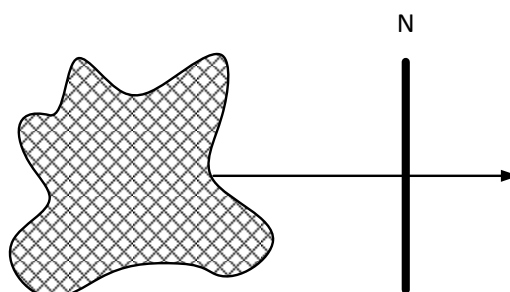
Nadomjesne sheme reaktancija AM-a po sustavima:



Napomena: Ove nadomjesne sheme vrijede samo kod proračuna početne struje kratkog spoja. Dalje se AM smatra pasivnim trošilom (dakle, nema više izvora u direktnom sustavu već samo reaktancija.)

Aktivna mreža

Aktivna mreža je postojeća mreža za koju je već proveden proračun kratkog spoja, na čije se sabirnice N priključuje novo rasklopno postrojenje unutar kojeg je potrebno odrediti struje kratkog spoja (Slika 11).



Aktivna mreža (A.M.)

Slika 11

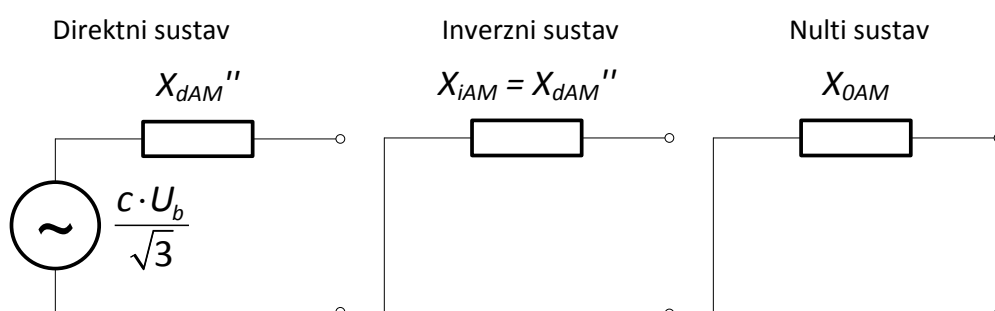
Iz provedenih proračuna kratkog spoja na sabirnicama N postojeće mreže, poznata je S_{K3} – rasklopna snaga trofaznog kratkog spoja na sabirnicama N te S_{K1} – rasklopna snaga jednofaznog kratkog spoja na sabirnicama N. Iz tih snaga te nazivnog napona, U_n , sabirnica N moguće je odrediti direktnu, inverznu i nultu reaktanciju cijele postojeće mreže. Tako određene reaktancije X_{dm} , X_{im} i X_{0m} predstavljaju reaktancije koje zamjenjuju cijelu postojeću mrežu u daljnjem proračunu kratkog spoja u novom rasklopnom postrojenju.

Nadomjesne reaktancije za aktivnu mrežu se računaju prema izrazima:

$$X_{dm}'' = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{K3}} = X_{im}$$

$$X_{0m} = c \cdot U_n^2 \cdot \left(\frac{3}{S_{K1}} - \frac{2}{S_{K3}} \right).$$

Nadomjesne sheme reaktancija aktivne mreže po sustavima:



Ako se novo rasklopno postrojenje priključuje na više sabirnica postojeće mreže, onda je potrebno postojeću mrežu nadomjestiti s više reaktancija (literatura¹²).

¹² Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 190 - 191

10. Pasivna trošila

Pasivna trošila su trošila koja za svoj rad ne koriste elektromagnetsko polje (žarulje, termička trošila, elektrolize ...). Prilikom proračuna struje kratkog spoja obično se ne uzimaju u obzir pasivna trošila, već se proračun provodi uz pretpostavku da se mreža nalazi u praznom hodu (znači neopterećena). Ako se ipak želi uzeti u obzir i pasivna trošila (opterećena mreža), onda je impedanciju pasivnog trošila moguće odrediti iz slijedeće relacije:

$$Z = \frac{U^2}{P} \cdot \cos^2 \varphi + j \frac{U^2}{Q} \cdot \sin^2 \varphi$$

\Rightarrow

$$R = \frac{U^2}{P} \cdot \cos^2 \varphi$$

$$X = \frac{U^2}{Q} \cdot \sin^2 \varphi$$

Osim toga potrebno je uzeti u obzir i povećanje EMS generatora, a s obzirom na njegovu EMS u praznom hodu, zbog zahtjeva trošila za nazivnim naponom na njihovim sabirnicama.

11. Metode proračuna kratkih spojeva

Metoda nadomjesnog naponskog izvora

Metoda nadomjesnog naponskog izvora je zapravo svođenje svih impendancija na isti (bazni napon). Proračun se provodi zasebno za direktni, inverzni i nulti sustav, pri čemu pretpostavljamo da vrijedi:

- 1) Na cijelu mrežu narinut je jedan (odabrani bazni napon) napon, što znači da u nadomjesnoj shemi sinkronog generatora te aktivnih trošila, asinkronih motora, aktivne mreže, sinkronih motora i kompenzatora naponi izvora:

$$\frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3}}$$

bez obzira na nazivni napon sabirnica. Za bazni napon mreže se u principu odabire nazivni napon koji se najčešće pojavljuje u mreži – mi ćemo raditi tako da bazni napon odgovara naponu mreže na mjestu kvara.

- 2) S obzirom da naponi pojedinih dijelova mreže ne odgovaraju baznom, a da bi snage u mreži ostale jednake stvarnima, potrebno je impedancije dijelova mreže čiji se nazivni napon razlikuje od baznoga, preračunati na bazni i to na slijedeći način:

$$\begin{aligned} S &= \text{konst.} = \frac{U^2}{Z} \\ \Rightarrow \frac{U_b^2}{Z_b} &= \frac{U_n^2}{Z_n} \\ \Rightarrow Z_b &= Z_n \cdot \frac{U_b^2}{U_n^2} \end{aligned}$$

Prema tome su nadomjesne reaktancije pojedinih elemenata mreže za ovu metodu:

$$X_g = \frac{x_{\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \left(\frac{U_b}{U_n} \right)^2 = \frac{x_{\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} [\Omega]$$

Generator:

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} \Leftarrow \text{korekcijski faktor}$$
$$X_{gK} = K_G \cdot X_g \Leftarrow \text{korigirana impedancija generatora}$$

gdje su:

U_n – nazivni napon sustava gdje se generator priključuje;

U_{nG} – nazivni napon generatora;

φ_{nG} – nazivni fazni kut generatora .

$$X_t = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \left(\frac{U_b}{U_n} \right)^2 = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} [\Omega]$$

Transformator:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} \Leftarrow \text{korekcijski faktor}$$

$$X_{tK} = K_T \cdot X_t \Leftarrow \text{korigirana impedancija transformatora}$$

Elektrana

$$Z_s = K_s (Z_g + Z_T)$$

$$X_{gK} = K_s \cdot X_g$$

$$X_{tK} = K_s \cdot X_t$$

$$K_s = \frac{U_n^2}{U_{nG}^2} \cdot \frac{U_{nTLV}^2}{U_{nTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{nG}} \Leftarrow \text{korekcijski faktor}$$

gdje su:

Z_s – korigirana impedancija elektrane;

Z_g – početna impedancija generatora (bez korekcijskog faktora K_g);

Z_T – impedancija blok transformatora (bez korekcijskog faktora K_T);

Prigušnica:

$$X_{pr} = \frac{x_{\%}}{100} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \left(\frac{U_b}{U_n} \right)^2 = \frac{x_{\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} [\Omega]$$

Vod i kabel:

$$X_{(b)} = X_{(n)} \cdot \left(\frac{U_b}{U_n} \right)^2 [\Omega]$$

Asinkroni motori:

$$X_{dM}'' = \frac{1}{I_p / I_n} \cdot \frac{U_n^2}{S_n} \cdot \left(\frac{U_b}{U_n} \right)^2 = \frac{1}{I_p / I_n} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} [\Omega]$$

Aktivna mreža:

$$X_{dm}'' = X_{im} = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{K3}} \cdot \left(\frac{U_b}{U_n} \right)^2 = \frac{c \cdot U_b^2}{S_{K3}} [\Omega]$$

$$X_{om} = c \cdot U_n^2 \cdot \left(\frac{U_b}{U_n} \right)^2 \cdot \left(\frac{3}{S_{K1}} - \frac{2}{S_{K3}} \right) = c \cdot U_b^2 \cdot \left(\frac{3}{S_{K1}} - \frac{2}{S_{K3}} \right) [\Omega]$$

ili

$$X_m = \frac{c \cdot U_n}{\sqrt{3} \cdot I_k''} , \text{ ako je poznata struja kratkog spoja za mrežu}$$

Napomena uz korekcijske faktore: **kada je riječ o generatoru i elektrani tada se korekcijski faktor koristi samo kod početne impedancije. Kada je riječ o mrežnom transformatoru tada se korekcijski faktor koristi uvijek.**

Korekcijski faktori odnose se na direktnu, inverzni i nultu impedanciju ali se ne odnose na impedanciju uzemljenja (Z_N).

- 3) Prilikom proračuna se pretpostavlja da su prijenosni omjeri svih transformatora 1:1, te da prelaskom s jedne strane transformatora na drugu dolazi samo do faznog zakreta napona i struja, i to na slijedeći način (definiraju se kutevi zakreta):

Ydk	Prelaz sa VN na NN	Prelaz sa NN na VN
Direktni sustav	$e^{-j\frac{k\pi}{6}}$	$e^{+j\frac{k\pi}{6}}$
Inverzni sustav	$e^{+j\frac{k\pi}{6}}$	$e^{-j\frac{k\pi}{6}}$
Nulti sustav	-	-

Δyk	Prelaz sa VN na NN	Prelaz sa NN na VN
Direktni sustav	$e^{-j\frac{k\pi}{6}}$	$e^{+j\frac{k\pi}{6}}$
Inverzni sustav	$e^{+j\frac{k\pi}{6}}$	$e^{-j\frac{k\pi}{6}}$
Nulti sustav	-	-

Yy0	Prelaz sa VN na NN	Prelaz sa NN na VN
Direktni sustav	-	-
Inverzni sustav	-	-
Nulti sustav	-	-

Yy6	Prelaz sa VN na NN	Prelaz sa NN na VN
Direktni sustav	-180°	180°
Inverzni sustav	180°	-180°
Nulti sustav	-	-

Nakon što su proračunate struje kroz sve elemente mreže te naponi svih sabirnica mreže uz prethodno navedene pretpostavke, potrebno je odrediti stvarne vrijednosti napona i struja mreže prema slijedećim relacijama:

$$I_{\text{stvarna}} = I_{\text{računska}} \cdot \frac{U_b}{U_n}$$

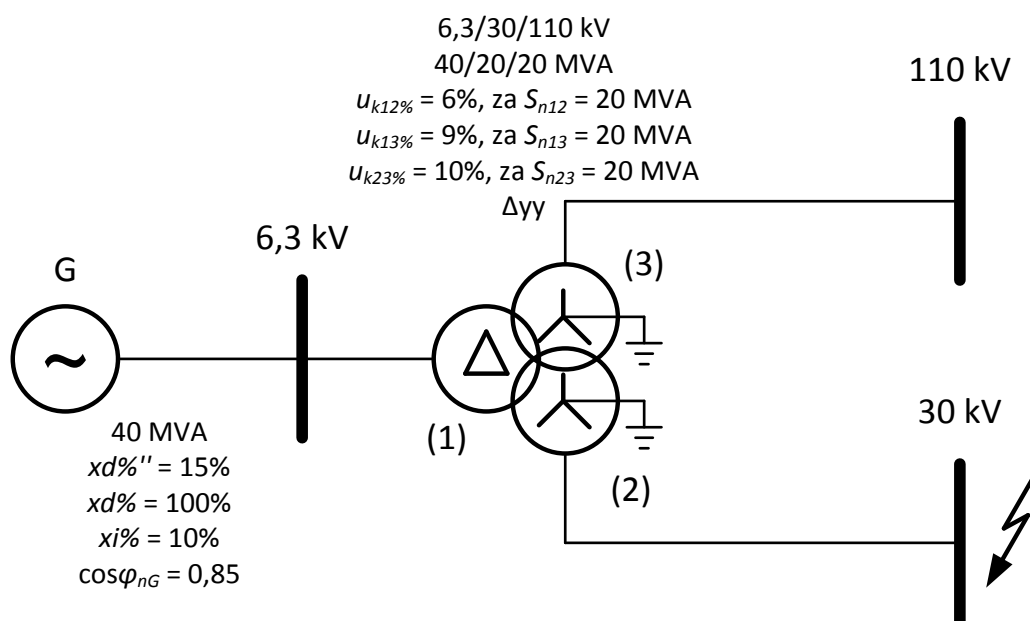
$$U_{\text{stvarni}} = U_{\text{računski}} \cdot \frac{U_n}{U_b}$$

Napomene vezana uz crtanje nadomjesnih shema:

Prilikom crtanja direktne i inverzne nadomjesne sheme sve nul – točke generatora, aktivne mreže te u početnoj direktnoj nadomjesnoj shemi asinkronih motora (u biti svih onih elemenata koji se u shemi pojavljuju kao izvori) spojene su na zajednički povratni vod (bez obzira jesu li one doista uzemljene kod istih elemenata).

Prilikom crtanja nulte nadomjesne sheme na zajednički povratni vod spojene su samo one točke nadomjesnih shema koje su i fizički doista uzemljene kod elemenata mreže (literatura¹³).

14. Primjer – Generator s neuzemljenim zvijezdištem preko tronamotnog transformatora napaja pasivne mreže 110 kV i 30 kV. Nacrtajte ekvivalentne sheme i izračunajte direktnu, inverznu i nultu reaktanciju, sve svedene na 30 kV, za slučaj kratkog spoja na sabirnicama nižeg napona. Mreže 110 kV i 30 kV uzemljene su samo preko transformatora.



¹³ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 114 i 115

Rješenje:

$$U_b = 30 \text{ kV}$$

$$X_d'' = \frac{x_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{15}{100} \cdot \frac{30^2}{40} = 3,375 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_d = \frac{x_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{100}{100} \cdot \frac{30^2}{40} = 22,5 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_i = \frac{x_{i\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{10}{100} \cdot \frac{30^2}{40} = 2,25 \Omega \text{ (po fazi)}$$

Generator:

$$\sin \varphi_{nG} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{nG}} = \sqrt{1 - 0,85^2} = 0,527$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} = \frac{6,3}{6,3} \cdot \frac{1,1}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} = 1,019$$

$$X_{dK}'' = K_G \cdot X_d'' = 3,441 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_{iK} = K_G \cdot X_i = 2,293 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_{12} = \frac{u_{k12\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{30^2}{20} = 2,7 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_{13} = \frac{u_{k13\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{9}{100} \cdot \frac{30^2}{20} = 4,05 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_{23} = \frac{u_{k23\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{10}{100} \cdot \frac{30^2}{20} = 4,5 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$K_{T12} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T12}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,06} = 1,009$$

Transformator:

$$K_{T13} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T13}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,09} = 0,991$$

$$K_{T23} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T23}} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,10} = 0,986$$

$$X_{12K} = K_{T12} \cdot X_{12} = 2,724 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_{13K} = K_{T13} \cdot X_{13} = 4,014 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_{23K} = K_{T23} \cdot X_{23} = 4,437 \Omega \text{ (po fazi)}$$

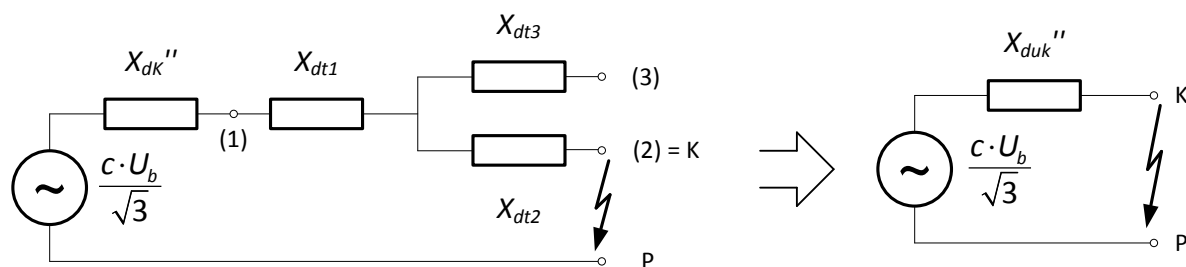
$$X_{dt1} = \frac{1}{2}(X_{12K} + X_{13K} - X_{23K}) = 1,151 \, \Omega$$

$$X_{dt2} = \frac{1}{2}(X_{12K} + X_{23K} - X_{13K}) = 1,574 \, \Omega$$

$$X_{dt3} = \frac{1}{2}(X_{13K} + X_{23K} - X_{12K}) = 2,864 \, \Omega$$

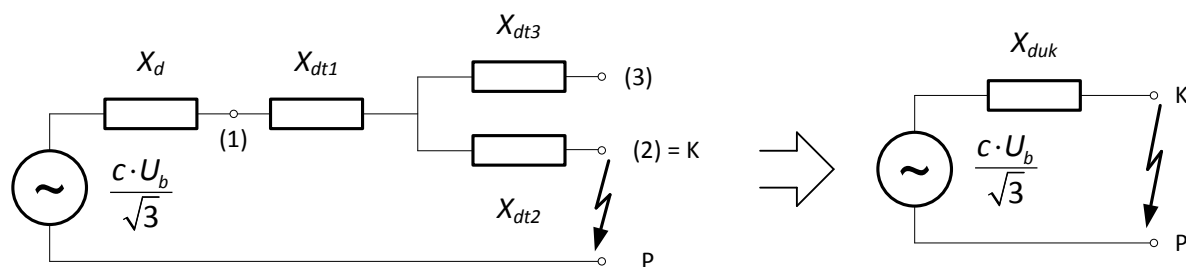
Nadomjesne sheme:

Direktni sustav (početni kratki spoj):



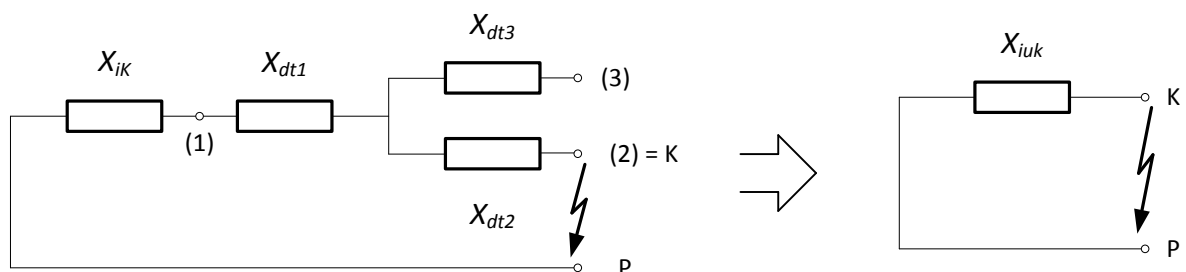
$$X_{duk}'' = X_{dk}'' + X_{dt1} + X_{dt2} = 3,441 + 1,151 + 1,574 = 6,166 \, \Omega$$

Direktni sustav (trajni kratki spoj):



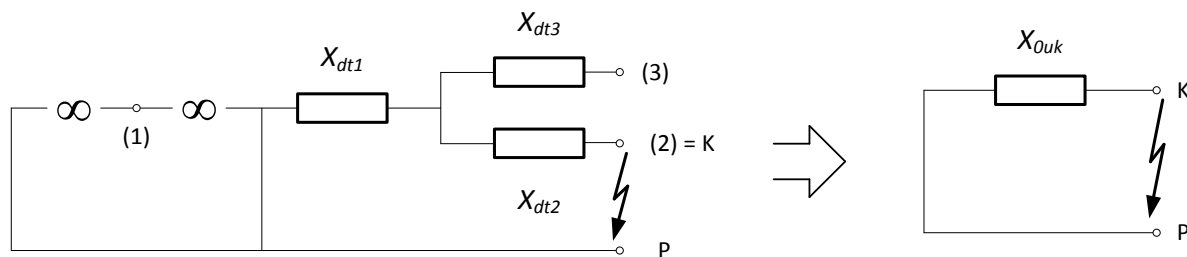
$$X_{duk} = X_d + X_{dt1} + X_{dt2} = 22,5 + 1,151 + 1,574 = 25,225 \, \Omega$$

Inverzni sustav:



$$X_{iuk} = X_{ik} + X_{dt1} + X_{dt2} = 2,293 + 1,151 + 1,574 = 5,018 \, \Omega$$

Nulti sustav:



$$X_{Ouk} = X_{dt1} + X_{dt2} = 1,151 + 1,574 = 2,725 \, \Omega$$

Napomena: U literaturi¹⁴ se nalazi još jedan primjer ekvivalentne sheme mreže za metodu reeduciranih impedancija. Zapravo je prikazano svođenje svih elemenata prikazane mreže na isti bazni napon.

¹⁴ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 108 i 109

Proračun sa relativnim (jediničnim) vrijednostima – per – unit metoda

Sve se veličine struja, napona, impedancija i snaga izražavaju u odnosu na neke osnovne veličine (jedinične vrijednosti struja/napona/impedancija/snaga):

$$i = \frac{I}{I_{\text{osnovno}}}; \quad u = \frac{U}{U_{\text{osnovno}}}; \quad z = \frac{Z}{Z_{\text{osnovno}}}; \quad s = \frac{S}{S_{\text{osnovno}}};$$

gdje su I_{osnovno} , U_{osnovno} , Z_{osnovno} , S_{osnovno} osnovne vrijednosti linijske struje, napona, impedancije i prividne snage mreže. Kako za te osnovne veličine moraju vrijediti relacije:

$$U_{\text{osnovno}} = \sqrt{3} \cdot I_{\text{osnovno}} \cdot Z_{\text{osnovno}}$$
$$S_{\text{osnovno}} = \sqrt{3} \cdot U_{\text{osnovno}} \cdot I_{\text{osnovno}}$$

evidentno je da je moguć izbor samo dvije osnovne veličine, čime su automatski, prethodno navedenim relacijama, određene preostale dvije osnovne veličine. Uobičajeno je odabrati osnovni napon, U_{osnovno} (kV) i prividnu snagu, S_{osnovno} (MVA) čime su automatski određene osnovne vrijednosti struje i impedancije:

$$I_{\text{osnovno}} = \frac{S_{\text{osnovno}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{osnovno}}} \quad [\text{kA}]$$
$$Z_{\text{osnovno}} = \frac{U_{\text{osnovno}}}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{osnovno}}} = \frac{U_{\text{osnovno}}}{\sqrt{3} \cdot \frac{S_{\text{osnovno}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{osnovno}}}} = \frac{U_{\text{osnovno}}^2}{S_{\text{osnovno}}} \quad [\Omega]$$

Računanje s jediničnim vrijednostima provodi se prema jednakim pravilima koja vrijede za stvarne vrijednosti, jer je:

$$U = \sqrt{3} \cdot I \cdot Z \quad /: U_{\text{osnovno}}$$
$$S = \sqrt{3} \cdot I \cdot U \quad /: S_{\text{osnovno}}$$
$$\Rightarrow$$
$$u = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot Z}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{osnovno}} \cdot Z_{\text{osnovno}}} = i \cdot z$$
$$s = \frac{\sqrt{3} \cdot I \cdot U}{\sqrt{3} \cdot I_{\text{osnovno}} \cdot U_{\text{osnovno}}} = i \cdot u$$

Odabir osnovnih vrijednosti

Osnovne vrijednosti je povoljno odabirati tako da se sve jedinične vrijednosti ne razlikuju puno od jedinice.

Ukoliko se odabere S_{osnovno} , tada je za cijelu mrežu mjerodavna ista osnovna prividna snaga.

Osnovna vrijednost napona odabire se za jedan proizvoljno odabrani dio mreže. Osnovne vrijednosti napona ostalih dijelova mreže, koji su međusobno spojeni transformatorima, određuju se u odnosu na taj proizvoljno odabrani napon te s obzirom na prijenosni omjer transformacije prema relaciji:

$$U_{\text{osnovnoB}} = U_{\text{osnovnoA}} \cdot \frac{U_B}{U_A}$$

gdje su:

$U_{\text{osnovnoA}}, U_{\text{osnovnoB}}$ - osnovni naponi dijelova mreže A i B

U_A/U_B – prijenosni omjer transformacije transformatora koji povezuje dijelove mreže A i B.

Jedinične vrijednosti impedancija pojedinih elemenata mreže

Transformator

Označimo sa Z_1 reaktanciju transformatora preračunatu na napon U_1 , a sa Z_2 preračunatu na napon U_2 . Među njima vrijedi odnos:

$$Z_1 = Z_2 \cdot \left(\frac{U_1}{U_2} \right)^2.$$

Jedinična reaktancija određena prema naponu U_1 , uz U_{osnovno1} i S_{osnovno} iznosi:

$$z_1 = \frac{Z_1}{U_{\text{osnovno1}}} = Z_1 \cdot \frac{S_{\text{osnovno1}}}{U_{\text{osnovno1}}^2}.$$

Kako između osnovnih napona U_{osnovno1} i U_{osnovno2} vrijedi odnos:

$$U_{\text{osnovno2}} = U_{\text{osnovno1}} \cdot \frac{U_2}{U_1},$$

onda je jedinična reaktancija određena prema naponu U_2 jednaka:

$$z_2 = \frac{Z_2}{U_{\text{osnovno2}}} = Z_2 \cdot \frac{S_{\text{osnovno2}}}{U_{\text{osnovno2}}^2} = Z_1 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2 \cdot \frac{S_{\text{osnovno1}}}{U_{\text{osnovno1}}^2 \cdot \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2} = Z_1 \cdot \frac{S_{\text{osnovno1}}}{U_{\text{osnovno1}}^2} = z_1.$$

Budući da je $z_1 = z_2$ može se zaključiti da transformator ima istu jediničnu reaktanciju bez obzira polazimo li od višeg ili nižeg napona.

Općenito svih elemenata kojima su reaktancije zadane u % ($x\%$)

Njihove se jedinične reaktancije mogu odrediti kao:

$$x = \frac{x\%}{100} \cdot \left(\frac{U_n}{U_{\text{osnovno}}} \right)^2 \cdot \frac{S_{\text{osnovno}}}{S_n} \quad (\text{p.u.})$$

gdje su:

U_n, S_n – nazivni linijski napon i prividna snaga promatranog elementa

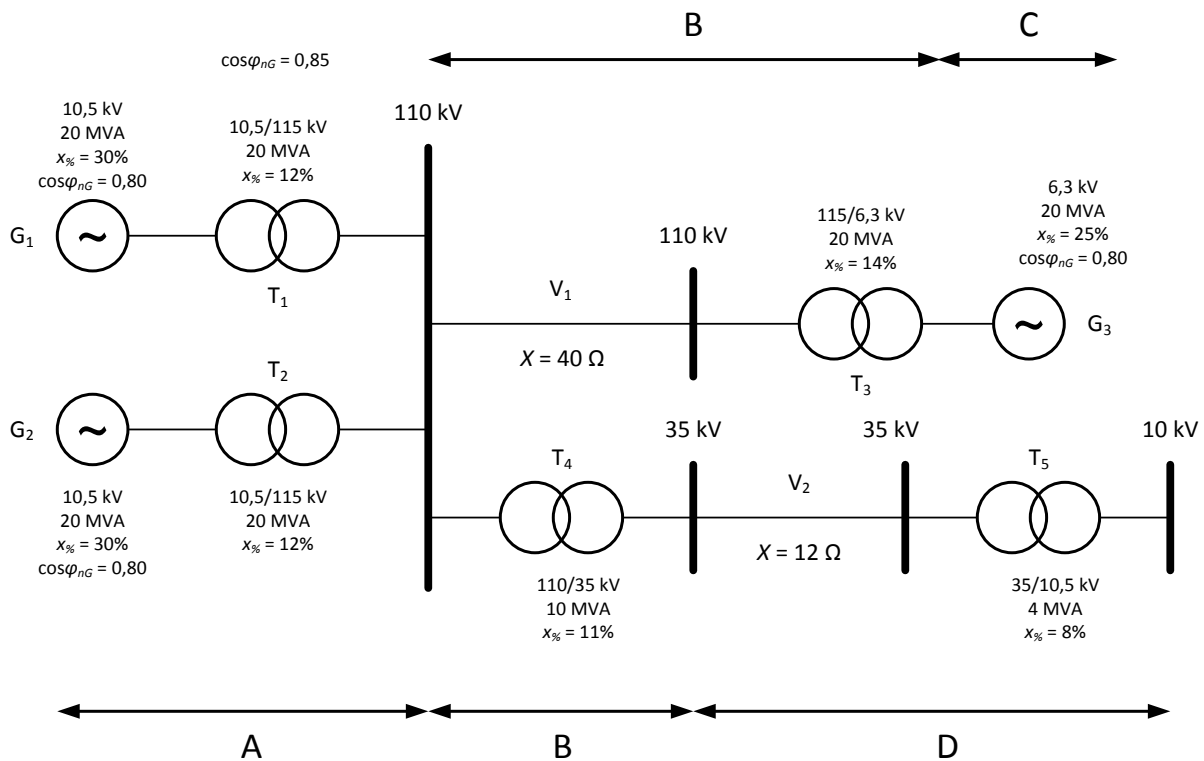
$U_{\text{osnovno}}, S_{\text{osnovno}}$ – osnovni linijski napon i snaga u dijelu mreže gdje se nalazi element

Ako su osnovna snaga i napon jednaki nazivnima za neki element mreže, onda jedinična reaktancija odgovara relativnoj vrijednosti reaktancije elementa.

Općenito svih elemenata kojima su reaktancije zadane u Ω (Z)

$$z = \frac{Z}{Z_{\text{osnovno}}} = Z \cdot \frac{S_{\text{osnovno}}}{U_{\text{osnovno}}^2} \quad (\text{p.u.})$$

15. Primjer – (literatura¹⁵) Za sve elemente mreže prema slici odredite jedinične reaktancije kao i nadomjesnu shemu mreže u direktnom sustavu.



¹⁵ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 112 - 114

Rješenje:

Odabran je $U_{osnovnoA} = 10,5 \text{ kV}$ i $S_{osnovno} = 20 \text{ MVA}$.

Prema tome je:

$$U_{osnovnoB} = U_{osnovnoA} \cdot \frac{115}{10,5} = 10,5 \cdot \frac{115}{10,5} = 115 \text{ kV}$$

$$U_{osnovnoC} = U_{osnovnoB} \cdot \frac{6,3}{115} = 115 \cdot \frac{6,3}{115} = 6,3 \text{ kV}$$

$$U_{osnovnoD} = U_{osnovnoB} \cdot \frac{35}{110} = 115 \cdot \frac{35}{110} = 36,6 \text{ kV}$$

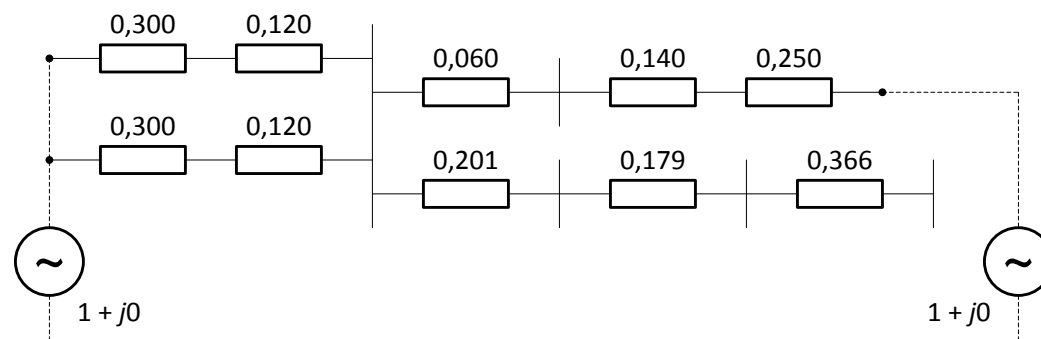
Osim toga je:

$$Z_{osnovnoB} = \frac{U_{osnovnoB}^2}{S_{osnovno}} = \frac{115^2}{20} = 661,25 \Omega$$

$$Z_{osnovnoD} = \frac{U_{osnovnoD}^2}{S_{osnovno}} = \frac{36,6^2}{20} = 67 \Omega$$

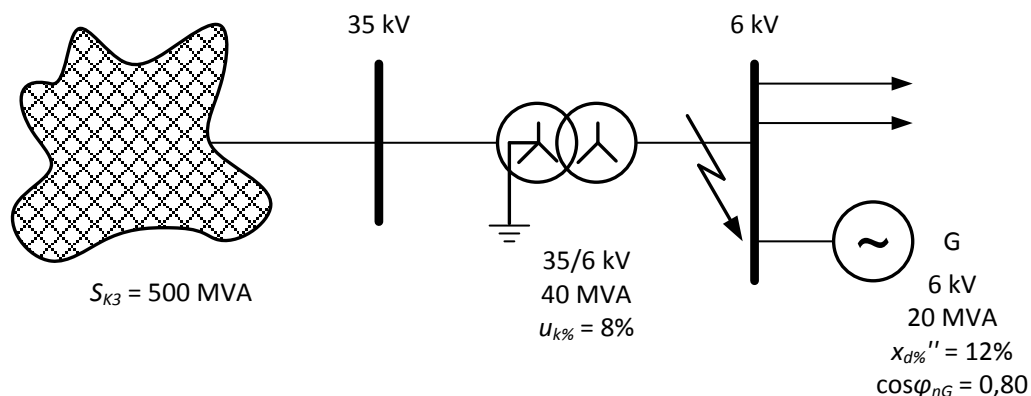
	Zadane veličine					Veličine nužne za proračun jedinične reaktancije						
		U_n kV	S_n MVA	x	X Ω	S_{osn} MVA	U_{osn} kV	Z_{osn} Ω	$\left(\frac{U_n}{U_{osn}}\right)^2$	$\frac{S_{osn}}{S_n}$	$\left(\frac{U_n}{U_{osn}}\right)^2 \cdot \frac{S_{osn}}{S_n}$	x p.u.
A	G ₁ , G ₂	10,5	20	0,30	-	20	10,5	-	1,000	1,000	1,000	0,300
	T ₁ , T ₂	10,5	20	0,12	-	20	10,5	-	1,000	1,000	1,000	0,120
B	V ₁	110	-	-	40	20	115	661	-	-	-	0,060
	T ₃	115	20	0,14	-	20	115	-	1,000	1,000	1,000	0,140
	T ₄	110	10	0,11	-	20	115	-	0,906	2,000	1,812	0,201
C	G ₃	6,3	10	0,25	-	20	6,3	-	1,000	1,000	1,000	0,250
D	V ₂	35	-	-	12	20	36,6	67	-	-	-	0,179
	T ₅	35	4	0,08	-	20	36,6	-	0,914	5,000	4,570	0,366

Nadomjesna shema u direktnom sustavu:



Zadatak 15 je poslužio samo kao primjer određivanja impedancija u 'per-unit' metodi a ne za proračun struja kratkog spoja. Stoga nisu korišteni korekcijski faktori za nadomjesne impedancije triju elektrana (generator + blok transformator).

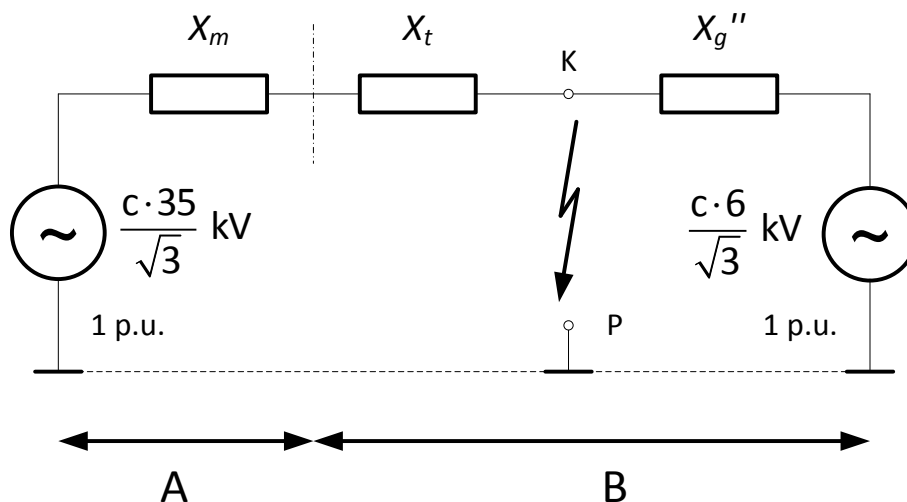
16. Primjer – Zadana je mreža prema slici. Metodom jediničnih vrijednosti odredite snagu početnog trofaznog kratkog spoja na mjestu označenom na slici.



Rješenje:

Odabran je $U_{\text{osnovnoA}} = 35 \text{ kV}$ i $S_{\text{osnovno}} = 20 \text{ MVA}$.

Za trofazni kratki spoj potrebna je nadomjesna shema direktnog sustava.



Dio mreže označen s A:

$$X_m = \frac{c \cdot U_n^2}{S_{K3}} = \frac{1,1 \cdot 35^2}{500} = 2,695 \, \Omega$$

$$Z_{\text{osnovnoA}} = \frac{U_{\text{osnovnoA}}^2}{S_{\text{osnovno}}} = \frac{35^2}{20} = 61,25 \, \Omega$$

$$I_{\text{osnovnoA}} = \frac{S_{\text{osnovno}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{osnovnoA}}} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 35} = 0,33 \text{ kA}$$

Dio mreže označen s B:

$$U_{\text{osnovnoB}} = U_{\text{osnovnoA}} \cdot \frac{6}{35} = 6 \text{ kV}$$

$$Z_{\text{osnovnoB}} = \frac{U_{\text{osnovnoB}}^2}{S_{\text{osnovno}}} = \frac{6^2}{20} = 1,8 \Omega$$

$$I_{\text{osnovnoB}} = \frac{S_{\text{osnovno}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{osnovnoB}}} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 6} = 1,925 \text{ kA}$$

	Zadane veličine					Veličine nužne za proračun jedinične reaktancije						
		U_n kV	S_n MVA	x	X Ω	S_{osn} MVA	U_{osn} kV	Z_{osn} Ω	$\left(\frac{U_n}{U_{\text{osn}}}\right)^2$	$\frac{S_{\text{osn}}}{S_n}$	$\left(\frac{U_n}{U_{\text{osn}}}\right)^2 \cdot \frac{S_{\text{osn}}}{S_n}$	x p.u.
A	AM	35	-	-	2,7	20	35	61,25	-	-	-	0,044
B	G	6	20	0,12	-	20	6	-	1	1	1	0,12
	T	6	40	0,08	-	20	6	-	1	0,5	0,5	0,04

Naknadno je potrebno korigirati jedinične reaktancije generatora i transformatora slijedećim korekcijskim faktorima:

Generator:

$$\sin \varphi_{nG} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{nG}} = \sqrt{1 - 0,80^2} = 0,6$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} = \frac{6,0}{6,0} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,12 \cdot 0,6} = 1,026$$

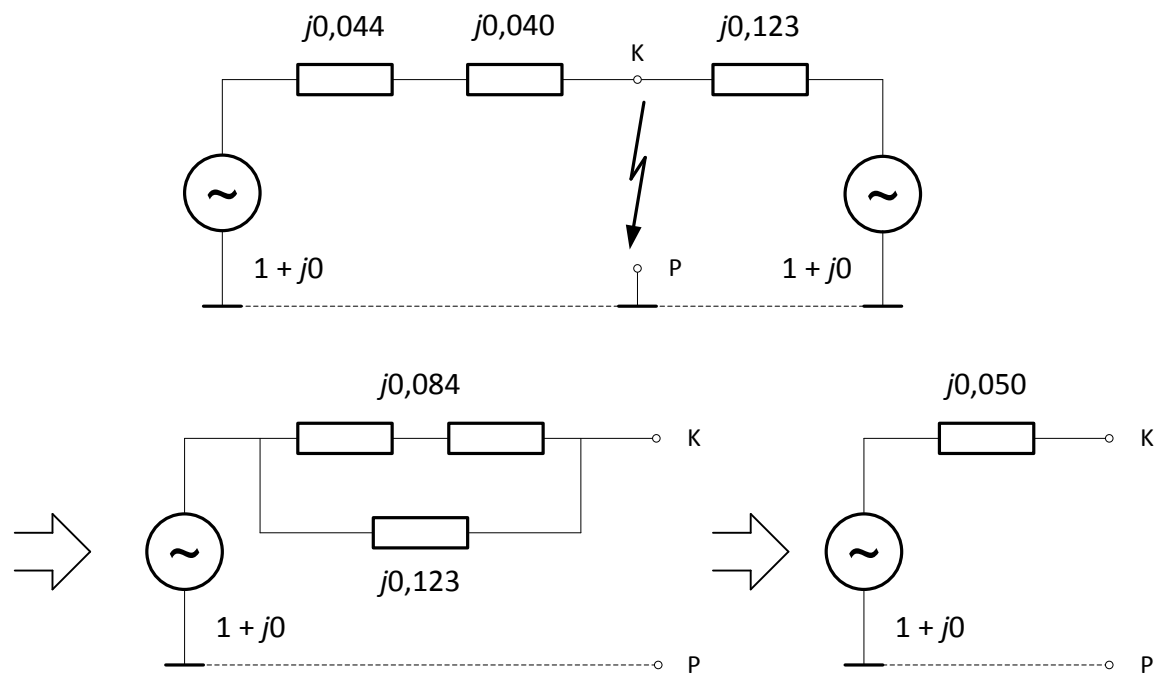
$$x_{gK}'' = K_G \cdot x_g'' = 1,026 \cdot 0,12 = 0,123 \text{ p.u.}$$

Transformator:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} = \frac{0,95 \cdot 1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,08} = 0,997$$

$$x_{TK} = K_T \cdot x_T = 0,997 \cdot 0,04 = 0,040 \text{ p.u.}$$

Nadomjesna shema:



$$I = \frac{c \cdot U}{x} = \frac{1,1 \cdot 1,0}{0,050} = 22,0 \text{ p.u.}$$

$$I_{\text{sabirnica}} = I \cdot I_{\text{osnovnoB}} = 22,0 \cdot 1,925 = 42,35 \text{ kA}$$

$$S = \frac{c \cdot U^2}{x} = \frac{1,1 \cdot 1,0^2}{0,050} = 22,0 \text{ p.u.}$$

$$S_{K3\text{sabirnica}} = S \cdot S_{\text{osnovno}} = 22,0 \cdot 20 = 440,0 \text{ MVA}$$

Napomena: U literaturi¹⁶ nalazi se primjer u kojem je prikazano određivanje jediničnih reaktancija tronamotnog transformatora.

¹⁶ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 113

12. Struje kratkog spoja

Osnovne pretpostavke

- a) Generatori proizvode simetrične elektromotorne sile:

$$\begin{aligned}E_R &= E_d \\E_S &= a^2 \cdot E_d \\E_T &= a \cdot E_d \\ \Rightarrow E_I &= E_0 = 0\end{aligned}$$

Isto vrijedi i za sve druge elemente kao što su aktivna mreža, asinkroni motori u početnom trenutku kratkog spoja koji u svojim nadomjesnim shemama sadrže elektromotorne sile.

- b) Pretpostavlja se da je mreža neposredno prije nastanka kvara u praznom hodu, što znači da možemo uzeti da je elektromotorna sila E_d jednaka faznom nazivnom naponu generator, V_n . Naime, da je mreža bila opterećena, onda bi za E_d bilo potrebno uzeti elektromotornu silu:

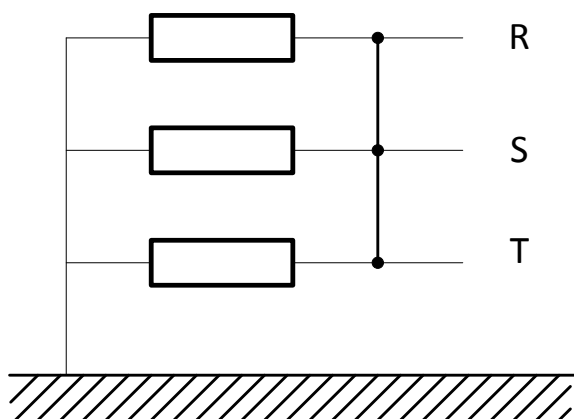
$$E_d = V_n + I \cdot jX_d''$$

koja je evidentno veća od napona V_n , a koja djeluje na početnu reaktanciju.

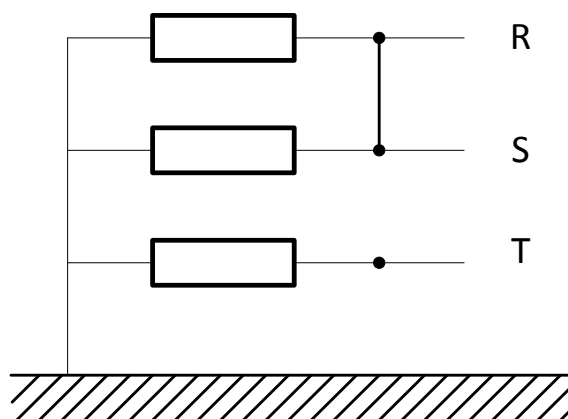
- c) Sve relacije koje opisuju prilike u mreži kod kratkog spoja opisane su impendancijama Z , a ne reaktancijama jX premda je realno praktično moguće (a to ćemo u zadacima i činiti) zanemariti R pored X pa impendancija zapravo postaje reaktancija.

Vrste kratkih spojeva

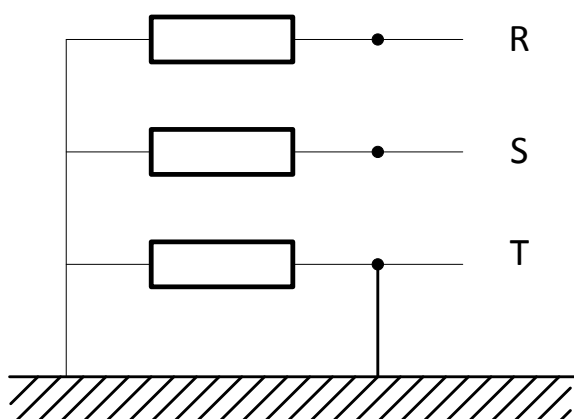
Trofazni kratki spoj (K3)



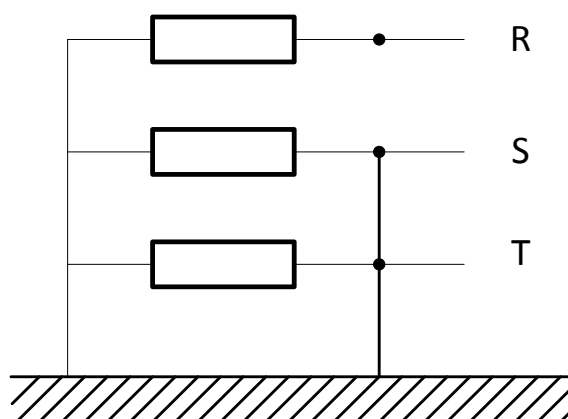
Dvofazni kratki spoj (K2)



Jednofazni kratki spoj (K1)



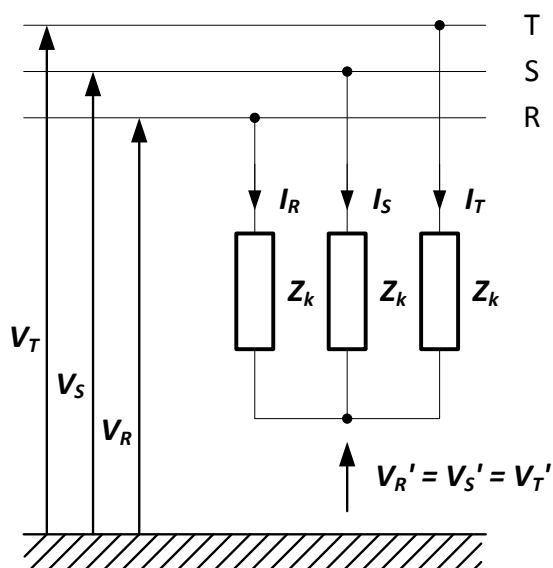
Dvofazni kratki spoj sa zemljom (K2Z)



Jednofazni kratki spoj (K1) i dvofazni kratki spoj sa zemljom (K2Z) imaju značenje kratkog spoja (velike struje) samo ako je nul – točka generator uzemljena, jer se inače u mreži pojavljuju relativno malene kapacitivne struje pa takve spojeve onda nazivamo **zemnim spojevima**.

Trofazni kratki spoj, K3

1. slučaj: K3 preko impedancije Z_k



Uvjeti na mjestu kvara:

$$I_R + I_S + I_T = 0$$

$$V_R' = V_S' = V_T'$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = Z_k \cdot \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} V_R' \\ V_S' \\ V_T' \end{bmatrix}$$

$$V_d = \frac{1}{3}(V_R + aV_S + a^2V_T) = \frac{1}{3}(V_R' + aV_S' + a^2V_T') + \frac{1}{3}Z_k \cdot (I_R + aI_S + a^2I_T) = \frac{1}{3} \cdot 0 + \frac{1}{3}Z_k \cdot 3 \cdot I_d$$

$$V_d = I_d \cdot Z_k$$

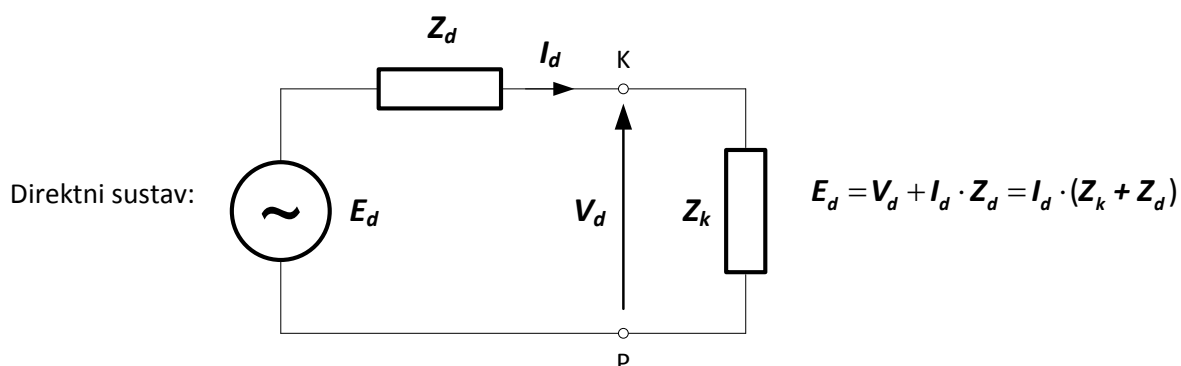
$$V_i = \frac{1}{3}(V_R + a^2V_S + aV_T) = \frac{1}{3}(V_R' + a^2V_S' + aV_T') + \frac{1}{3}Z_k \cdot (I_R + a^2I_S + aI_T) = \frac{1}{3} \cdot 0 + \frac{1}{3}Z_k \cdot 3 \cdot I_i$$

$$V_i = I_i \cdot Z_k$$

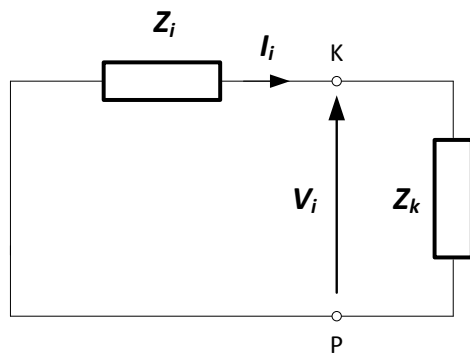
$$V_0 = \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T) = \frac{1}{3}(V_R' + V_S' + V_T') + \frac{1}{3}Z_k \cdot (I_R + I_S + I_T) = \frac{1}{3} \cdot 3V_R' + \frac{1}{3}Z_k \cdot 0$$

$$V_0 = V_R' = V_S' = V_T'$$

Nadomjesne sheme:



Inverzni sustav:

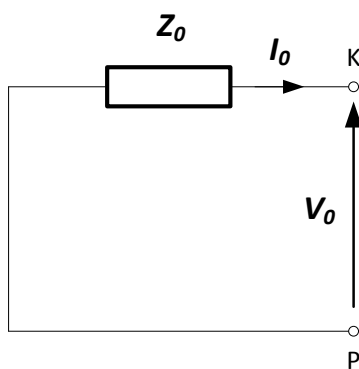


$$0 = V_i + I_i \cdot Z_i = I_i \cdot (Z_k + Z_i)$$

$$\Rightarrow I_i = 0$$

$$\Rightarrow V_i = 0$$

Nulti sustav:



$$0 = V_0 + I_0 \cdot Z_0$$

$$I_0 = 0 \text{ (ne može se zatvoriti)}$$

$$\Rightarrow V_0 = 0 = V_R' = V_S' = V_T'$$

Struje i naponi na mjestu kvara:

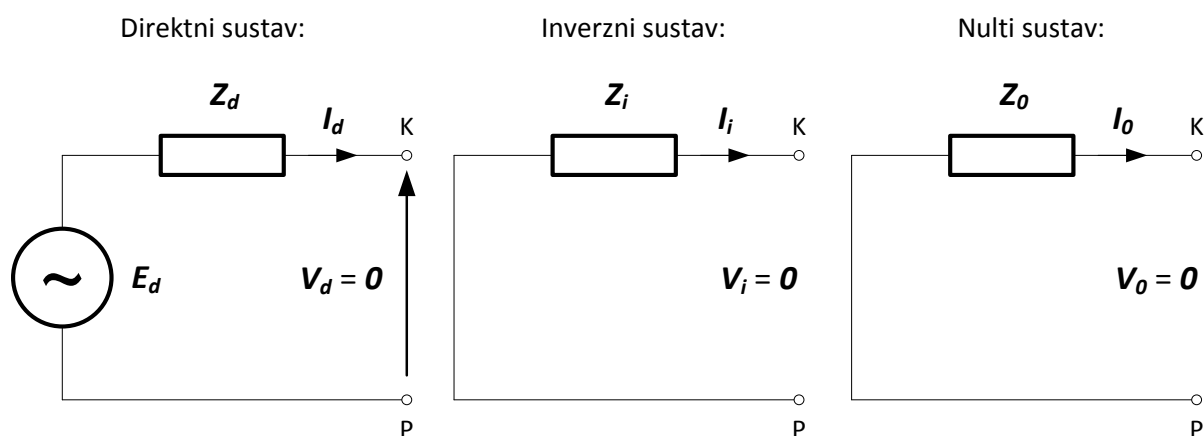
$$\text{Struje: } \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_k} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \quad \text{Naponi: } \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \frac{Z_k}{Z_d + Z_k} \cdot E_d \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix}$$

$$I_{K3} = I_d = \frac{E_d}{Z_k + Z_d}$$

$$|I_{K3}| = |I_d| = \frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3} |Z_k + Z_d|}$$

Ako je $Z_k = 0$ slijedi:

Nadomjesne sheme:



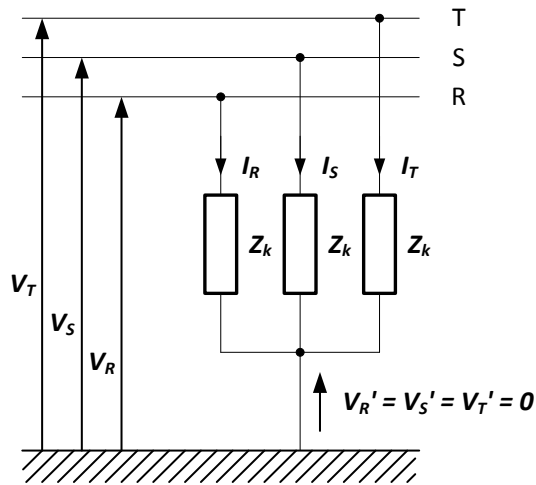
Struje i naponi na mjestu kvara:

$$\text{Struje: } \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ a^2 \\ a \end{bmatrix} \quad \text{Naponi: } \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$I_{K3} = I_d = \frac{E_d}{Z_d}$$

$$|I_{K3}| = |I_d| = \frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3} |Z_d|}$$

2. slučaj: K3 preko impedancije Z_k sa zemljom (vrijede iste formule kao i u 1. slučaju)



Uvjeti na mjestu kvara:

$$V_R' = V_S' = V_T' = 0$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = Z_k \cdot \begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix}$$

$$V_d = \frac{1}{3}(V_R + aV_S + a^2V_T) = I_d \cdot Z_k$$

$$\Rightarrow E_d = (Z_d + Z_k) \cdot I_d$$

$$V_i = \frac{1}{3}(V_R + a^2V_S + aV_T) = I_i \cdot Z_k$$

$$\Rightarrow 0 = (Z_i + Z_k) \cdot I_i$$

$$\Rightarrow I_i = 0$$

$$\Rightarrow V_i = 0$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T) = I_0 \cdot Z_0$$

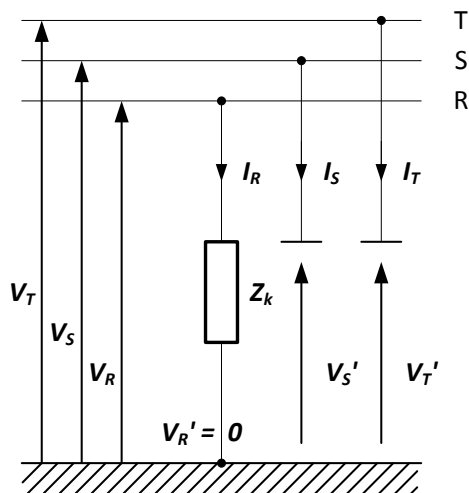
$$\Rightarrow 0 = (Z_0 + Z_k) \cdot I_0$$

$$\Rightarrow I_0 = 0$$

$$\Rightarrow V_0 = 0$$

Nadomjesne sheme su iste kao u slučaju 1.

Jednofazni kratki spoj, K1



Uvjeti na mjestu kvara:

$$I_S = I_T = 0$$

$$V_R' = 0$$

$$V_R = I_R \cdot Z_k$$

$$I_S = I_T = 0 \Rightarrow I_d = I_i = I_0 = \frac{I_R}{3}$$

$$\Rightarrow I_{K1} = 3I_d = I_R$$

$$V_d = E_d - I_d \cdot Z_d$$

$$V_i = -I_i \cdot Z_i = -I_d \cdot Z_i$$

$$V_0 = -I_0 \cdot Z_0 = -I_d \cdot Z_0$$

\Rightarrow

$$V_R = V_d + V_i + V_0 = E_d - I_d \cdot (Z_d + Z_i + Z_0) = 3 \cdot I_d \cdot Z_k$$

\Rightarrow

$$I_d = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_k} = I_i = I_0$$

$$I_{K1} = 3 \cdot I_d = \frac{3E_d}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_k}$$

$$|I_{K1}| = 3 \cdot |I_d| = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_b}{|Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_k|}$$

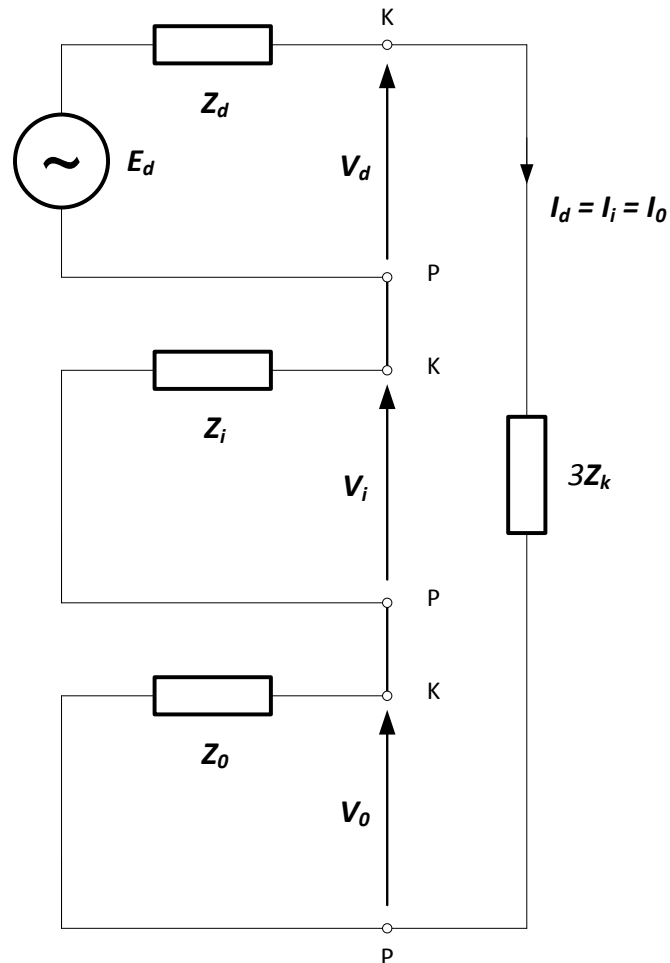
$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_k} \cdot \begin{bmatrix} Z_i + Z_0 + 3Z_k \\ -Z_i \\ -Z_0 \end{bmatrix}$$

Struje i naponi na mjestu kvara:

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_0 + 3Z_k} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_o + 3Z_k} \cdot \begin{bmatrix} 3Z_k \\ (a^2 - a)Z_i + (a^2 - 1)Z_o + 3Z_k \\ (a - a^2)Z_i + (a - 1)Z_o + 3Z_k \end{bmatrix}$$

Nadomjesna shema:



Ako je $Z_k = 0$, vrijede prethodne relacije i nadomjesna shema.

$$I_{K1} = 3 \cdot I_d = \frac{3E_d}{Z_d + Z_i + Z_o}$$

$$|I_{K1}| = 3 \cdot |I_d| = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_b}{|Z_d + Z_i + Z_o|}$$

Specijalan je slučaj kada je $Z_0 = \infty$ (što znači da mreža nije uzemljena) kada je riječ o **ZEMNOM SPOJU**.

$$I_d = I_i = I_o = 0$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{bmatrix} = E_d \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

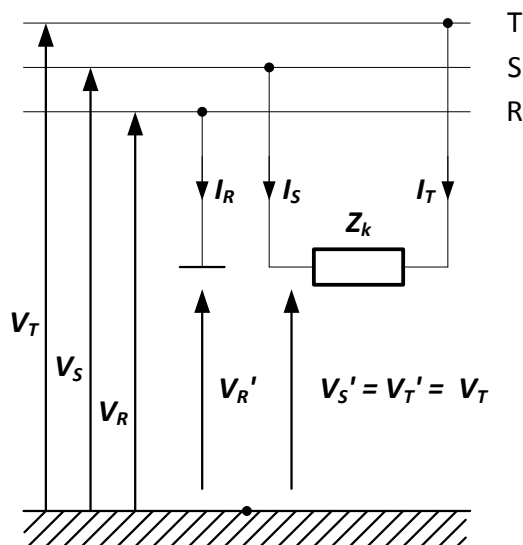
Struje i naponi na mjestu kvara:

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} (*) \quad \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = E_d \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ a^2 - 1 \\ a - 1 \end{bmatrix}$$

Naponi na mjestu kratkog spoja poprimaju linijske vrijednosti.

(*zapravo je riječ o malim kapacitivnim strujama)

Dvofazni kratki spoj, K2



Uvjeti na mjestu kvara:

$$I_R = 0$$

$$I_S + I_T = 0$$

$$V_S' = V_T' = V_T$$

$$V_S = V_S' + I_S \cdot Z_k = V_T + I_S \cdot Z_k$$

$$I_d = \frac{1}{3} \cdot (I_R + aI_S + a^2I_T) = \frac{1}{3}(a - a^2)I_S$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot (I_R + a^2I_S + aI_T) = \frac{1}{3}(a^2 - a)I_S$$

$$I_0 = \frac{1}{3} \cdot (I_R + I_S + I_T) = 0$$

$$\Rightarrow V_0 = 0$$

$$V_d = \frac{1}{3}(V_R + aV_S + a^2V_T) = \frac{1}{3}V_R + \frac{a}{3}(V_T + I_S \cdot Z_k) + \frac{a^2}{3}V_T$$

$$V_i = \frac{1}{3}(V_R + a^2V_S + aV_T) = \frac{1}{3}V_R + \frac{a^2}{3}(V_T + I_S \cdot Z_k) + \frac{a}{3}V_T$$

$$V_d - V_i = \frac{I_S \cdot Z_k}{3} \cdot (a - a^2)$$

$$E_d = V_d + I_d \cdot Z_d$$

$$0 = V_i + I_i \cdot Z_i \quad / -$$

\Rightarrow

$$E_d = (V_d - V_i) + I_d \cdot (Z_d + Z_i) = I_d \cdot (Z_k + Z_d + Z_i)$$

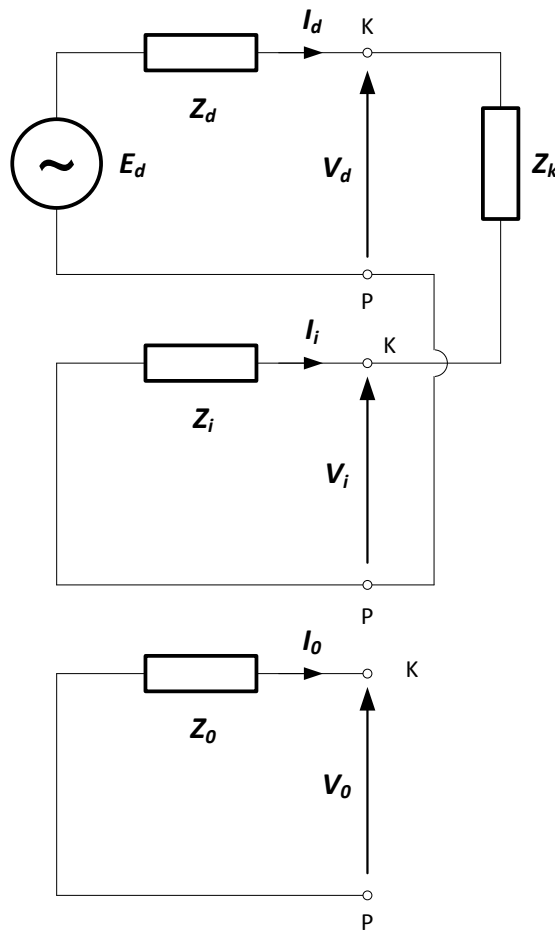
$$I_d = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_k}$$

$$I_i = -I_d$$

$$I_0 = 0$$

$$\Rightarrow \begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_k} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{i} \quad \begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_k} \cdot \begin{bmatrix} Z_i + Z_k \\ Z_i \\ 0 \end{bmatrix}$$

Nadomjesna shema:



Struje i naponi na mjestu kvara:

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_k} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ a^2 - a \\ a - a^2 \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_k} \cdot \begin{bmatrix} Z_i + 2Z_k \\ (a^2 + a)Z_i + a^2Z_k \\ (a + a^2)Z_i + aZ_k \end{bmatrix}$$

Iznos struje dvofaznog kratkog spoja:

$$I_{K2} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_k} \cdot (a^2 - a) = I_S$$

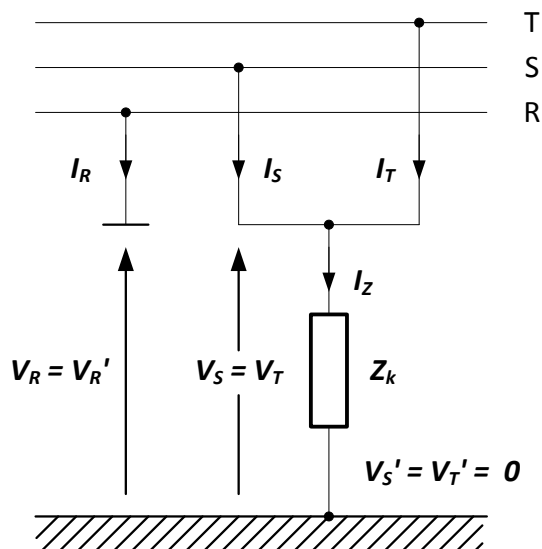
$$|I_{K2}| = \left| \frac{E_d}{Z_d + Z_i + Z_k} \right| \cdot \sqrt{3} = \frac{c \cdot U_b}{|Z_d + Z_i + Z_k|}$$

Ako je $Z_k = 0$, vrijede prethodne relacije i nadomjesna shema.

$$I_{K2} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i} \cdot (a^2 - a) = I_S$$

$$|I_{K2}| = \left| \frac{E_d}{Z_d + Z_i} \right| \cdot \sqrt{3} = \frac{c \cdot U_b}{|Z_d + Z_i|}$$

Dvofazni kratki spoj sa zemljom, K2Z



Uvjeti na mjestu kvara:

$$I_R = 0$$

$$V_S' = V_T' = 0$$

$$I_S + I_T = I_Z$$

$$V_R = V_R'$$

$$V_S = V_T = I_Z \cdot Z_k = Z_k \cdot (I_S + I_T)$$

$$I_d = \frac{1}{3} \cdot (aI_S + a^2I_T)$$

$$I_i = \frac{1}{3} \cdot (a^2I_S + aI_T)$$

$$\Rightarrow I_d + I_i = \frac{1}{3}aI_Z + \frac{1}{3}a^2I_Z = -\frac{I_Z}{3} = -I_0$$

$$I_0 = \frac{1}{3} \cdot (I_S + I_T) = \frac{I_Z}{3}$$

$$I_R = 0$$

\Rightarrow

$$V_d = \frac{1}{3}(V_R + aV_S + a^2V_T) = \frac{V_R}{3} - \frac{I_Z \cdot Z_k}{3}$$

$$V_i = \frac{1}{3}(V_R + a^2V_S + aV_T) = \frac{V_R}{3} - \frac{I_Z \cdot Z_k}{3} = V_d$$

$$V_0 = \frac{1}{3}(V_R + V_S + V_T) = \frac{V_R}{3} + \frac{2}{3}I_Z \cdot Z_k = \frac{V_R}{3} - \frac{I_Z \cdot Z_k}{3} + I_Z \cdot Z_k = V_d + I_Z \cdot Z_k = V_d + 3I_0 \cdot Z_k$$

$$E_d = V_d + I_d \cdot Z_d$$

$$0 = V_i + I_i \cdot Z_i$$

$$0 = V_0 + I_0 \cdot Z_0 \Rightarrow -I_0 \cdot Z_0 = -\frac{I_Z}{3} \cdot Z_0 = V_0 = V_d + I_Z \cdot Z_k$$

\Rightarrow

$$V_d = -I_Z \cdot \left(\frac{Z_0}{3} + Z_k \right) = \frac{V_R}{3} - \frac{I_Z \cdot Z_k}{3} \Rightarrow \frac{V_R}{3} = -I_Z \cdot \left(\frac{Z_0}{3} + \frac{2}{3}Z_k \right)$$

$$V_d = -I_z \cdot \left(\frac{Z_0}{3} + Z_k \right)$$

$$V_i = V_d = -I_z \cdot \left(\frac{Z_0}{3} + Z_k \right)$$

$$V_0 = -\frac{I_z}{3} \cdot Z_0$$

$$I_d = \frac{E_d - V_d}{Z_d}$$

$$I_i = -\frac{V_i}{Z_i} \quad / \quad +$$

$$I_d + I_i = \frac{E_d}{Z_d} - V_d \cdot \left(\frac{1}{Z_d} + \frac{1}{Z_i} \right) = \frac{E_d}{Z_d} + I_z \cdot \left(\frac{Z_0}{3} + Z_k \right) \cdot \left(\frac{Z_d + Z_i}{Z_d \cdot Z_i} \right) = -\frac{I_z}{3}$$

\Rightarrow

$$\frac{I_z}{3} = -\frac{E_d \cdot Z_i}{Z_d \cdot Z_i + (Z_0 + 3Z_k) \cdot (Z_d + Z_i)} = I_0$$

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d \cdot Z_i + (Z_0 + 3Z_k) \cdot (Z_d + Z_i)} \cdot \begin{bmatrix} Z_i + Z_0 + 3Z_k \\ -Z_0 - 3Z_k \\ -Z_i \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_0 \end{bmatrix} = \frac{E_d \cdot Z_i}{Z_d \cdot Z_i + (Z_0 + 3Z_k) \cdot (Z_d + Z_i)} \cdot \begin{bmatrix} Z_0 + 3Z_k \\ Z_0 + 3Z_k \\ Z_0 \end{bmatrix}$$

Tako je struja 2KZ jednaka:

$$I_{K2Z} = \frac{3E_d Z_i}{Z_d \cdot Z_i + (Z_0 + 3Z_k) \cdot (Z_d + Z_i)} = 3I_0$$

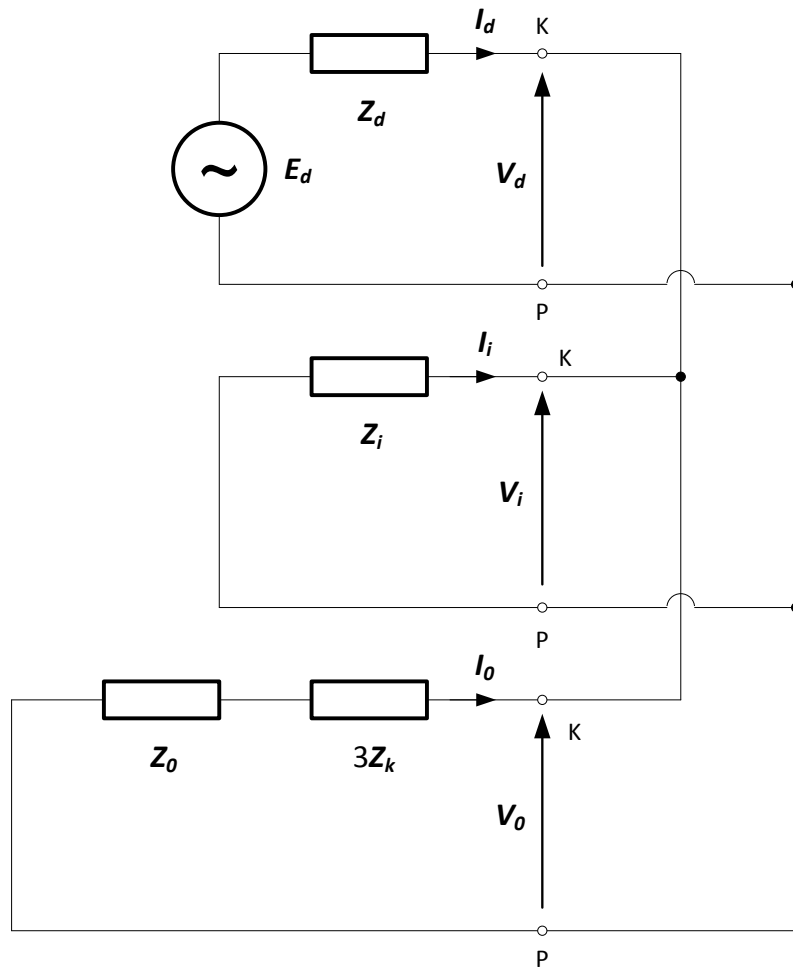
$$|I_{K2Z}| = 3 \left| \frac{E_d Z_i}{Z_d \cdot Z_i + (Z_0 + 3Z_k) \cdot (Z_d + Z_i)} \right| = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_b |Z_i|}{|Z_d \cdot Z_i + (Z_0 + 3Z_k) \cdot (Z_d + Z_i)|}$$

Struje i naponi na mjestu kvara:

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d \cdot Z_i + (Z_0 + 3Z_k) \cdot (Z_d + Z_i)} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ (a^2 - 1)Z_i + (a^2 - a) \cdot (Z_0 + 3Z_k) \\ (a - 1)Z_i + (a - a^2) \cdot (Z_0 + 3Z_k) \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \frac{E_d \cdot Z_i}{Z_d \cdot Z_i + (Z_0 + 3Z_k) \cdot (Z_d + Z_i)} \cdot \begin{bmatrix} 3Z_0 + 6Z_k \\ -3Z_k \\ -3Z_k \end{bmatrix}$$

Nadomjesna shema:



Ako je $Z_k = 0$, vrijede prethodne relacije i nadomjesna shema.

$$I_{k22} = \frac{3E_d Z_i}{Z_d Z_i + Z_d Z_0 + Z_i Z_0} = 3I_0$$

$$|I_{k22}| = 3 \left| \frac{E_d Z_i}{Z_d Z_i + Z_d Z_0 + Z_i Z_0} \right| = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_b |Z_i|}{|Z_d Z_i + Z_d Z_0 + Z_i Z_0|}$$

Specijalan je slučaj kada je $Z_0 = \infty$ (što znači da mreža nije uzemljena) kada je riječ o **ZEMNOM SPOJU**.

$$\begin{bmatrix} I_d \\ I_i \\ I_o \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad \text{i} \quad \begin{bmatrix} V_d \\ V_i \\ V_o \end{bmatrix} = \frac{E_d \cdot Z_i}{Z_d + Z_i} \cdot \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

Struje i naponi na mjestu kvara:

$$\begin{bmatrix} I_R \\ I_S \\ I_T \end{bmatrix} = \frac{E_d}{Z_d + Z_i} \cdot \begin{bmatrix} 0 \\ a^2 - a \\ a - a^2 \end{bmatrix} \quad \text{i} \quad \begin{bmatrix} V_R \\ V_S \\ V_T \end{bmatrix} = \frac{E_d \cdot Z_i}{Z_d + Z_i} \cdot \begin{bmatrix} 3 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

Usporedba vrsta kratkih spojeva prema veličini struje

Pri izboru opreme u rasklopnim postrojenjima potrebno je znati za koju vrstu kratkog spoja se kroz opremu pojavljuje najveća struja kratkog spoja. U literaturi¹⁷ je dan dijagram kojemu su osi:

$$\alpha = \frac{Z_i}{Z_d} \quad \text{i} \quad \beta = \frac{Z_i}{Z_0}$$

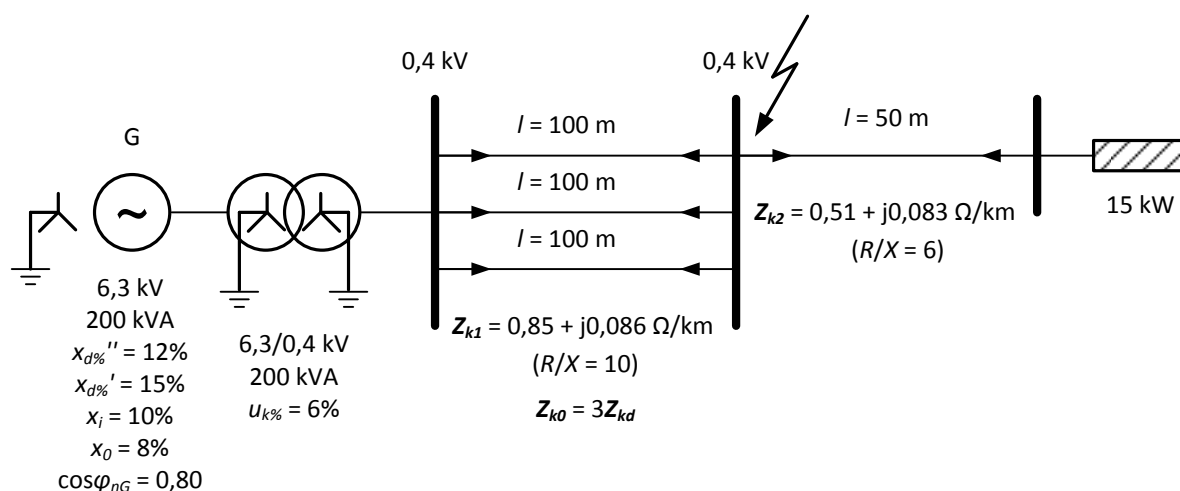
iz kojeg je moguće uz prethodno poznate vrijednosti α i β za neku točku mreže, odrediti koja vrsta kratkog spoja u toj točki mreže uzrokuje najveće struje kvara.

Iz navedenog je dijagrama moguće primjetiti slijedeće:

- 1) Ako mreža nije uzemljena tada je $Z_0 = \infty$ i $\beta = 0$. Znači za ovakve mreže vrijede odnosi na apscisnoj osi, odnosno maksimalne struje javljaju se prilikom K3 ili K2 (što je i logično jer se zbog $Z_0 = \infty$ u K1 i K2Z javljaju tek male kapacitivne struje).
- 2) Ako promotrimo kratki spoj na stezaljkama generatora u početnom trenutku ($Z_i = Z_d''$) ili kratki spoj daleko u mreži ($Z_i = Z_d$), vrijednost veličine α je jednaka 1. Znači za ovakve točke mreže vrijede odnosi na pravcu $\alpha = 1$, odnosno maksimalne struje kratkog spoja javljaju se prilikom K1 ili K3. Ako je mreža izolirana ($\alpha = 1$ i $\beta = 0$), mjerodavan je K3.

Za određivanje najgore vrste kratkog spoja može poslužiti i dijagram na slici 10 u skripti IEC 60909-0.

17. Primjer – Za djelomičnu shemu razvoda nekog manjeg industrijskog pogona odredite iznos struje početnog trofaznog i jednofaznog kratkog spoja na mjestu označenom na slici.



¹⁷ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 167

Rješenje:

Bazni napon je: $U_b = 0,4 \text{ kV}$.

$$K_s = \frac{U_n^2}{U_{nG}^2} \cdot \frac{U_{nTHV}^2}{U_{nTLV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{nG}} \Leftarrow \text{korekcijski faktor}$$

Elektrana

$$\sin \varphi_{nG} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{nG}} = \sqrt{1 - 0,80^2} = 0,6$$

$$K_s = \frac{0,4^2}{6,3^2} \cdot \frac{6,3^2}{0,4^2} \cdot \frac{1,1}{1 + |0,12 - 0,06| \cdot 0,6} = 1,062$$

$$X_{dg}'' = \frac{x_{d\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{0,4^2}{0,2} = 0,096 \, \Omega$$

$$X_{ig} = \frac{x_{i\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{10}{100} \cdot \frac{0,4^2}{0,2} = 0,08 \, \Omega$$

$$X_{og} = \frac{x_{0\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{8}{100} \cdot \frac{0,4^2}{0,2} = 0,064 \, \Omega$$

Generator (E):

$$X_{dgK}'' = K_s \cdot X_{dg}'' = 1,062 \cdot 0,096 = 0,102 \, \Omega$$

$$X_{igK} = K_s \cdot X_{ig} = 1,062 \cdot 0,08 = 0,085 \, \Omega$$

$$X_{ogK} = K_s \cdot X_{og} = 1,062 \cdot 0,064 = 0,068 \, \Omega$$

Napomena: X_{dg}' ne računamo jer nas zanima početna struja K3 i K1!

Transformator (E):

$$X_{dt} = X_{it} \cong X_{ot} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{0,4^2}{0,2} = 0,048 \, \Omega$$

$$X_{dtK} = K_s \cdot X_{dt} = 1,062 \cdot 0,048 = 0,051 \, \Omega$$

$$Z_{dk} = Z_{ik} = Z_{k1} \cdot l = (0,85 + j0,086) \cdot 0,1 = 0,085 + j0,0086 \, \Omega$$

$$Z_{ok} = 3 \cdot Z_{dk} = 3 \cdot (0,085 + j0,0086) = 0,255 + j0,0258 \, \Omega$$

Kabeli:

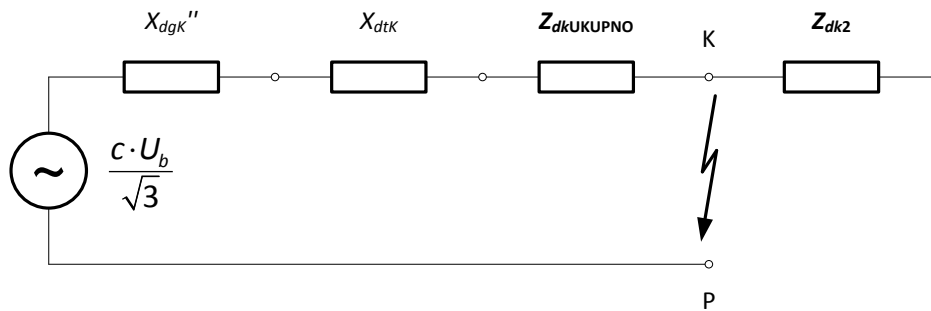
(kabeli su spojeni paralelno) \Rightarrow

$$Z_{dkUKUPNO} = \frac{Z_{dk}}{3} = 0,028 + j0,0029 \, \Omega$$

$$Z_{okUKUPNO} = \frac{Z_{ok}}{3} = 0,085 + j0,0086 \, \Omega$$

Trofazni kratki spoj, K3:

Nadomjesna shema:



$$Z_d = Z_{K3uk} = jX_{dgK}'' + jX_{dtK} + Z_{dkUKUPNO} = j0,102 + j0,051 + 0,028 + j0,0029$$

$$Z_d = 0,028 + j0,156 \cong 0,158 \angle 79,82^\circ \Omega$$

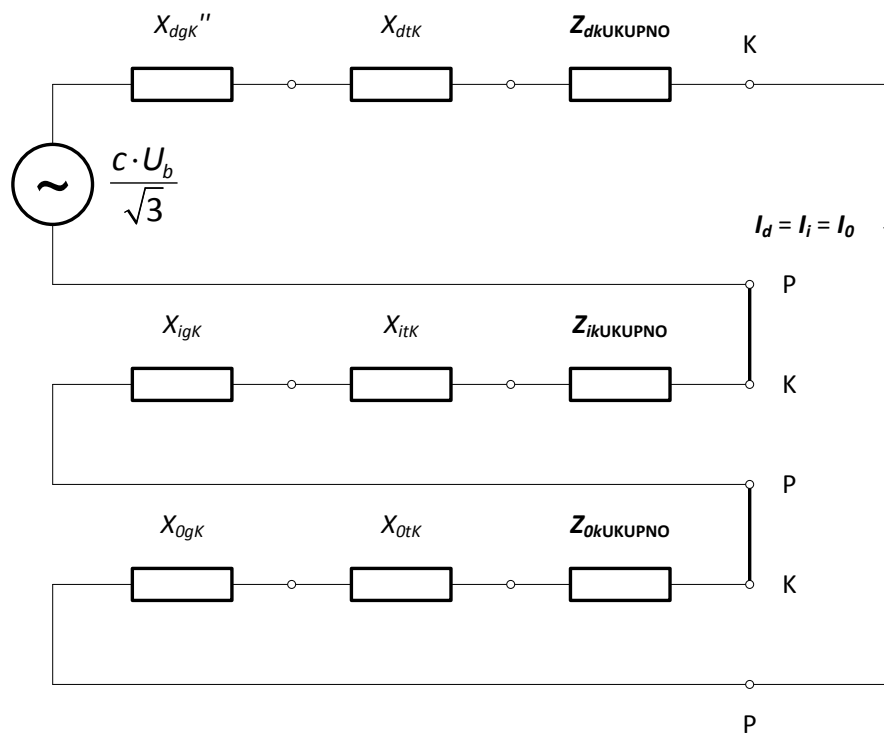
R/X je jednako $0,028/0,156 = 0,18 < 0,577$ pa se stoga djelatni otpor može u daljnjim proračunima zanemariti.

$$I_{K3}'' = I_d'' = \frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3} \cdot |Z_d|} = \frac{1,1 \cdot 0,4}{\sqrt{3} \cdot 0,158} = 1,608 \text{ kA}$$

To je fazna struja na mjestu kvara.

Jednofazni kratki spoj, K1:

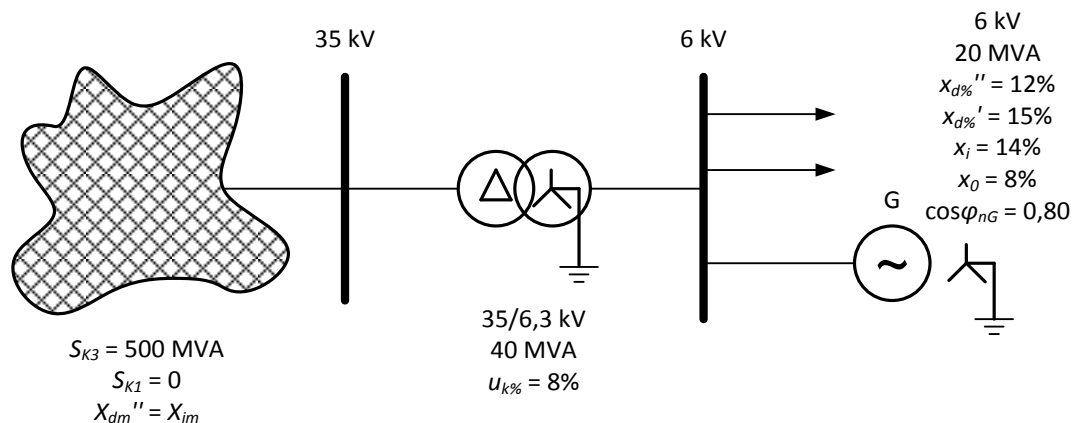
Nadomjesna shema:



$$\begin{aligned}
 Z_{K1uk} &= jX_{dgK}'' + jX_{dtK} + Z_{dkUKUPNO} + jX_{igK} + jX_{itK} + Z_{ikUKUPNO} + jX_{ogK} + jX_{otK} + Z_{okUKUPNO} \\
 &= j0,102 + j0,051 + 0,028 + j0,0029 + j0,085 + j0,051 + 0,028 + j0,0029 \\
 &\quad + j0,068 + j0,051 + 0,085 + j0,0086 \\
 &= 0,141 + j0,4224 = 0,445 \angle 71,54^\circ \Omega
 \end{aligned}$$

$$|I_{K1}| = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_b}{|Z_{K1uk}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 0,4}{0,445} = 1,71 \text{ kA}$$

18. Primjer – Na slici je prikazana shema jedne industrijske mreže. Odredite struju početnog trofaznog i jednofaznog kratkog spoja na sabirnicama 6 kV.



Rješenje:

Bazni napon je: $U_b = 6 \text{ kV}$.

$$X_{dg}'' = \frac{x_{d\%}''}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{12}{100} \cdot \frac{6^2}{20} = 0,216 \Omega$$

$$X_{ig} = \frac{x_{i\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{14}{100} \cdot \frac{6^2}{20} = 0,252 \Omega$$

$$X_{og} = \frac{x_{0\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{8}{100} \cdot \frac{6^2}{20} = 0,144 \Omega$$

Generator (G):

$$\sin \varphi_{nG} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{nG}} = \sqrt{1 - 0,80^2} = 0,6$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} = \frac{6,0}{6,0} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,12 \cdot 0,6} = 1,026$$

$$X_{dK}'' = K_G \cdot X_d'' = 0,222 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_{iK} = K_G \cdot X_i = 0,259 \Omega \text{ (po fazi)}$$

$$X_{oK} = K_G \cdot X_0 = 0,148 \Omega \text{ (po fazi)}$$

Napomena: X_{dg}' ne računamo jer nas zanima početna struja K3 i K1!

$$X_{dA.M.}'' = X_{iA.M.} = \frac{c \cdot U_b^2}{S_{K3m}} = \frac{1,1 \cdot 6^2}{500} = 0,0792 \, \Omega$$

Aktivna mreža:

$$X_{0A.M.} = c \cdot U_b^2 \cdot \left(\frac{3}{S_{K1m}} - \frac{2}{S_{K3m}} \right) = \infty$$

$$X_{dt} = X_{it} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{8}{100} \cdot \frac{6^2}{40} = 0,072 \, \Omega$$

$$X_{0t} \cong X_{dt} = 0,072 \, \Omega$$

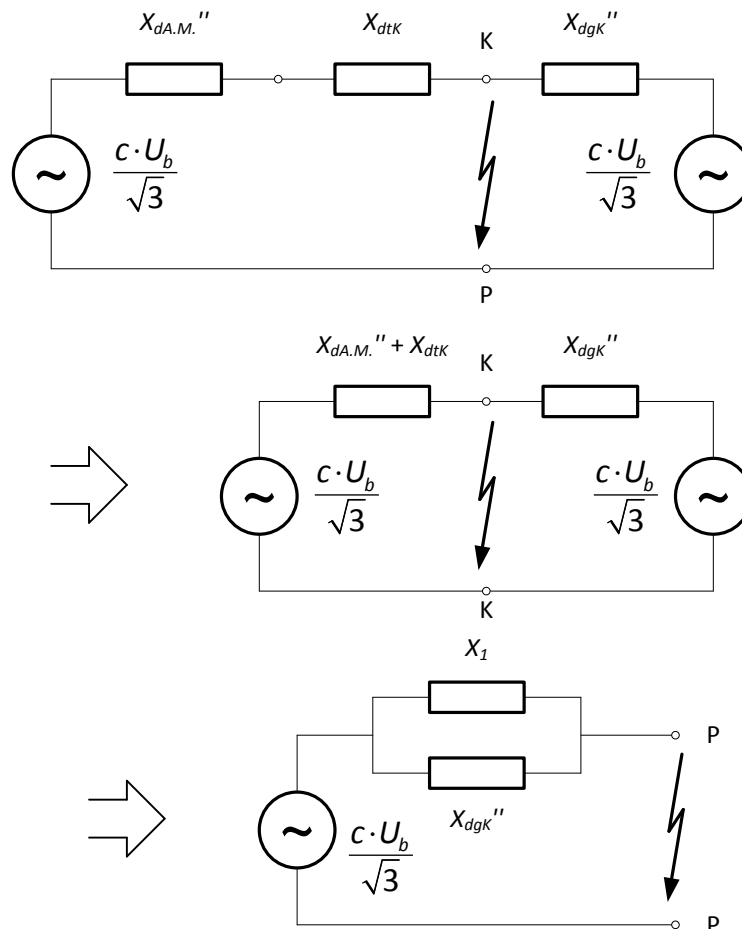
Transformator:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,08} = 0,997$$

$$X_{dtK} = X_{itK} = X_{0tK} = K_T \cdot X_{dt} = 1,050 \cdot 0,072 = 0,0718 \, \Omega$$

Trofazni kratki spoj, K3:

Nadomjesna shema:



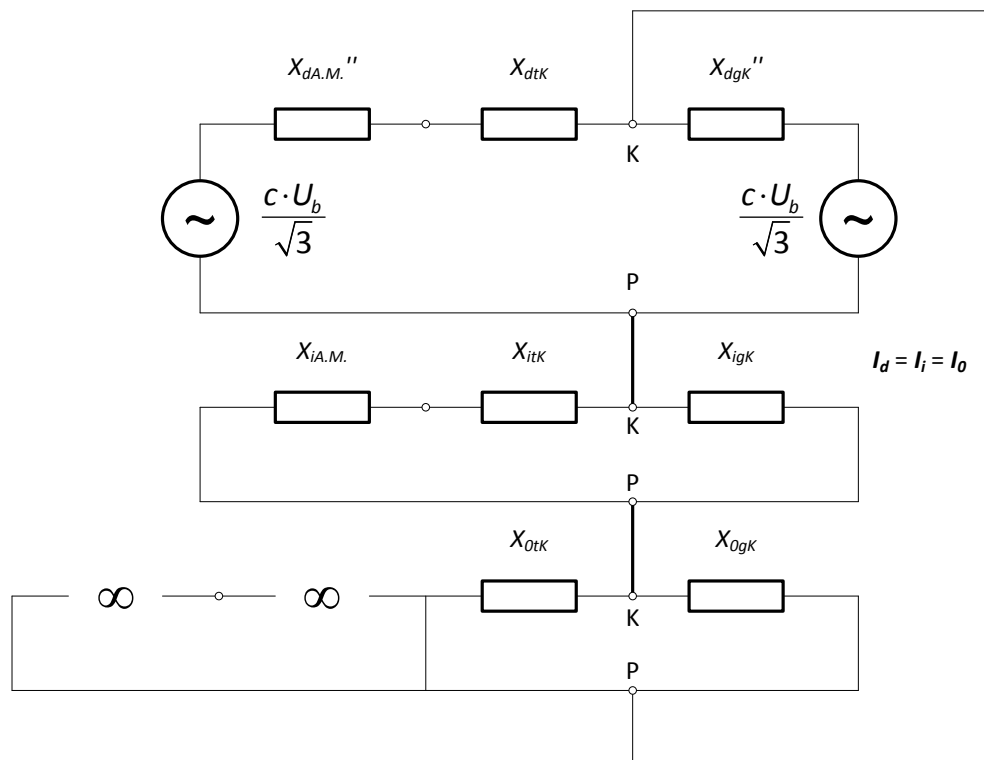
$$X_1 = X_{dA.M.}'' + X_{dtK} = 0,0792 + 0,0718 = 0,151 \, \Omega$$

$$X_{duk}'' = (X_1 || X_{dgK}'') = \frac{0,151 \cdot 0,222}{0,151 + 0,222} = 0,0899 \, \Omega$$

$$I_{K3}'' = I_d'' = \frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3} \cdot |Z_d|} = \frac{1,1 \cdot 6}{\sqrt{3} \cdot 0,0899} = 42,400 \, \text{kA}$$

Jednofazni kratki spoj, K1:

Nadomjesna shema:



$$X_1 = X_{dA.M.}'' + X_{dtK} = 0,0792 + 0,0718 = 0,151 \, \Omega$$

$$X_{duk}'' = (X_1 || X_{dgK}'') = 0,0899 \, \Omega$$

$$X_2 = X_{iA.M.} + X_{itK} = 0,0792 + 0,0718 = 0,151 \, \Omega$$

$$X_{iuk} = (X_2 || X_{igK}) = 0,0954 \, \Omega$$

$$X_{0uk} = (X_{0tK} || X_{0gK}) = 0,048 \, \Omega$$

$$I_{K1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_b}{X_{duk}'' + X_{iuk} + X_{0uk}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 6}{(0,0899 + 0,0954 + 0,048)} = 48,999 \, \text{kA}$$

S druge strane je:

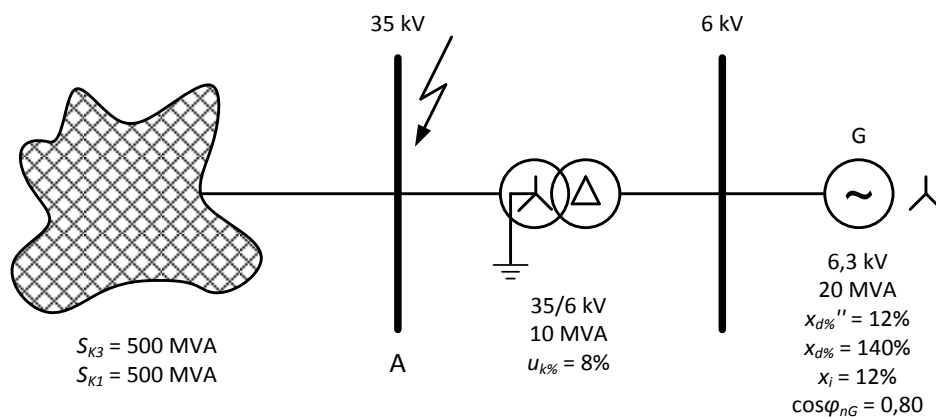
$$\beta = \frac{Z_i}{Z_o} = \frac{X_{iuk}}{X_{ouk}} = \frac{0,0954}{0,048} = 1,99$$

$$\alpha = \frac{Z_i}{Z_d} = \frac{X_{iuk}}{X_{duk}} = \frac{0,0954}{0,0899} = 1,06$$

Iz literature¹⁸, za dobivene parametre slijedi da je K1 je najnepovoljnija vrsta kratkog spoja za to mjesto kvara u promatranoj mreži, što se podudara i s omjerom:

$$\frac{I_{K1}''}{I_{K3}''} = \frac{48,999}{42,400} = 1,156.$$

19. Primjer – Odredite omjer početne struje jednofaznog i trofaznog kratkog spoja na mjestu A za mrežu prema slici.



Rješenje:

Bazni napon je: $U_b = 35 \text{ kV}$.

$$X_{dg}'' = \frac{12}{100} \cdot \frac{35^2}{20} = 7,35 \Omega$$

$$X_{ig} = X_{dg}'' = 7,35 \Omega$$

$$X_{0g} = \infty$$

Generator (G):

$$\sin \varphi_{nG} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{nG}} = \sqrt{1 - 0,80^2} = 0,6$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} = \frac{6,0}{6,3} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,12 \cdot 0,6} = 0,977$$

$$X_{dgK}'' = X_{igK} = K_G \cdot X_{dg}'' = 7,181 \Omega \text{ (po fazi)}$$

¹⁸ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 167

Napomena: X_{dg}' ne računamo jer nas zanima početna struja K3 i K1!

$$X_{dA.M.}'' = X_{iA.M.} = \frac{c \cdot U_b^2}{S_{K3}} = \frac{c \cdot 35^2}{500} = 2,695 \Omega$$

Aktivna mreža:

$$X_{oA.M.} = c \cdot U_b^2 \left(\frac{3}{S_{K1}} - \frac{2}{S_{K3}} \right) = \frac{c \cdot 35^2}{500} = X_{dA.M.}'' = 2,695 \Omega$$

$$X_{dt} = X_{it} = \frac{8}{100} \cdot \frac{35^2}{10} = 9,8 \Omega$$

$$X_{ot} \cong X_{dt} = 9,8 \Omega$$

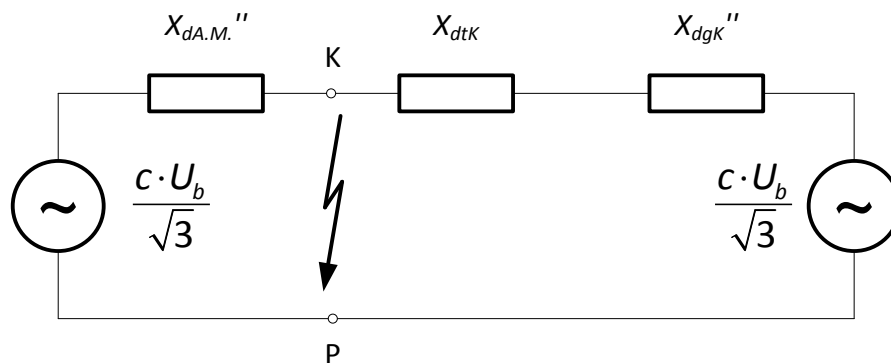
Transformator:

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,08} = 0,997$$

$$X_{dtK} = X_{itK} = X_{otK} = K_T \cdot X_{dt} = 0,997 \cdot 9,8 = 9,771 \Omega$$

Trofazni kratki spoj, K3:

Nadomjesna shema:

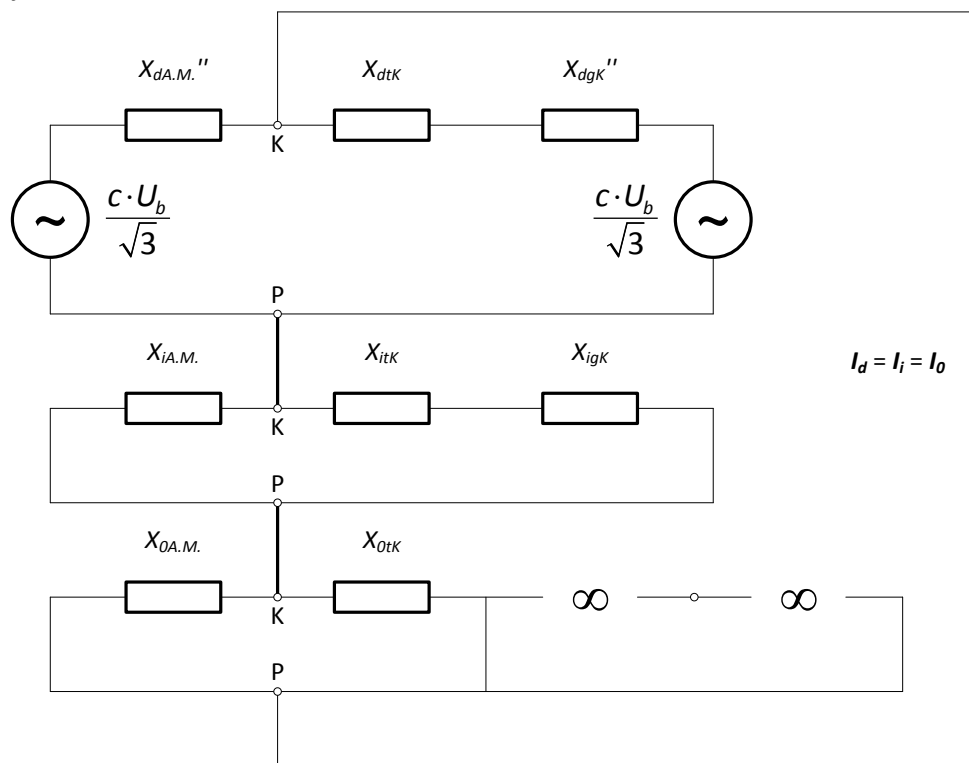


$$X_{duk}'' = X_{dA.M.}'' || (X_{dtK} + X_{dgK}'') = 2,325 \Omega$$

$$I_{K3}'' = \frac{c \cdot U_b \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot X_{duk}''} = \frac{1,1 \cdot 35}{\sqrt{3} \cdot 2,325} = 9,560 \text{ kA}$$

Jednofazni kratki spoj, K1:

Nadomjesna shema:



$$X_{duk}'' = 2,325 \, \Omega$$

$$X_{iuk} = X_{duk}'' = 2,325 \, \Omega$$

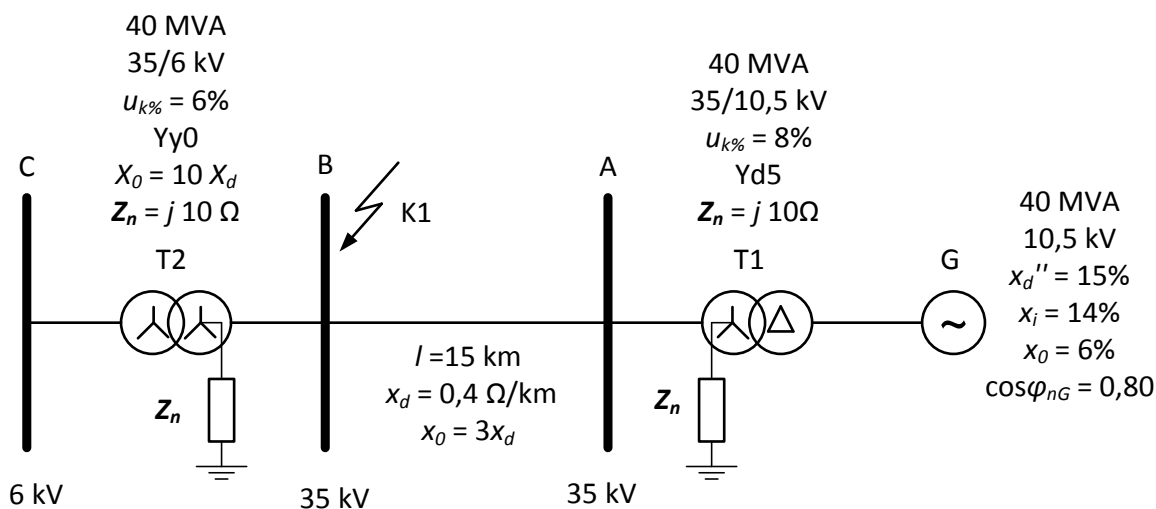
$$X_{0uk} = (X_{0A.M.} || X_{0tk}) = 2,112 \, \Omega$$

$$I_{K1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_b}{X_{duk}'' + X_{iuk} + X_{0uk}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 35}{(2,325 + 2,325 + 2,112)} = 9,862 \, \text{kA}$$

Omjer početne struje jednofaznog i trofaznog KS na mjestu A u mreži s nadomjesne sheme jednak je:

$$\frac{I_{K1}''}{I_{K3}''} = \frac{9,862}{9,560} = 1,0315$$

20. Primjer – Za zadanu shemu razvodne mreže prema slici, odredite za slučaj jednofaznog KS na sabirnici B, struju kvara kao i stvarne struje svih elemenata te stvarne napone na pojedinim sabirnicama mreže.



Rješenje:

Bazni napon je: $U_b = 35 \text{ kV}$.

Elektrana

$$K_s = \frac{U_n^2}{U_{nG}^2} \cdot \frac{U_{nTLV}^2}{U_{nTHV}^2} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + |x_d'' - x_T| \sin \varphi_{nG}}$$

$$\sin \varphi_{nG} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{nG}} = \sqrt{1 - 0,80^2} = 0,6$$

$$K_s = \frac{35^2}{10,5^2} \cdot \frac{10,5^2}{35^2} \cdot \frac{1,1}{1 + |0,15 - 0,08| \cdot 0,6} = 1,056$$

$$X_{dg}'' = \frac{15}{100} \cdot \frac{35^2}{40} = 4,6 \, \Omega$$

$$X_{ig} = \frac{14}{100} \cdot \frac{35^2}{40} = 4,3 \, \Omega$$

$$X_{0g} = \frac{6}{100} \cdot \frac{35^2}{40} = 1,84 \, \Omega$$

Generator (G):

$$X_{dgK}'' = K_s \cdot X_{dg}'' = 1,056 \cdot 4,6 = 4,858 \, \Omega$$

$$X_{igK} = K_s \cdot X_{ig} = 1,056 \cdot 4,3 = 4,541 \, \Omega$$

$$X_{0gK} = K_s \cdot X_{0g} = 1,056 \cdot 1,84 = 1,943 \, \Omega$$

Transformator (T1):

$$X_{dT1} = X_{iT1} = \frac{8}{100} \cdot \frac{35^2}{40} = 2,45 \, \Omega$$

$$X_{OT1} \cong X_{dT1} = 2,45 \, \Omega$$

$$3Z_N = 30 \, \Omega$$

$$X_{dt1K} = X_{it1K} = X_{ot1K} = K_s \cdot X_{dT1} = 1,056 \cdot 2,45 = 2,587 \, \Omega$$

$$X_{dT2} = X_{iT2} = \frac{6}{100} \cdot \frac{35^2}{40} = 1,84 \, \Omega$$

$$X_{OT2} = 10 \cdot X_{dT2} = 18,4 \, \Omega$$

$$3Z_N = 30 \, \Omega$$

Transformator (T2):

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,06} = 1,009$$

$$X_{dt2K} = X_{it2K} = K_T \cdot X_{dT2} = 1,009 \cdot 1,84 = 1,856 \, \Omega$$

$$X_{ot2K} = K_T \cdot X_{OT2} = 1,009 \cdot 18,4 = 18,56 \, \Omega$$

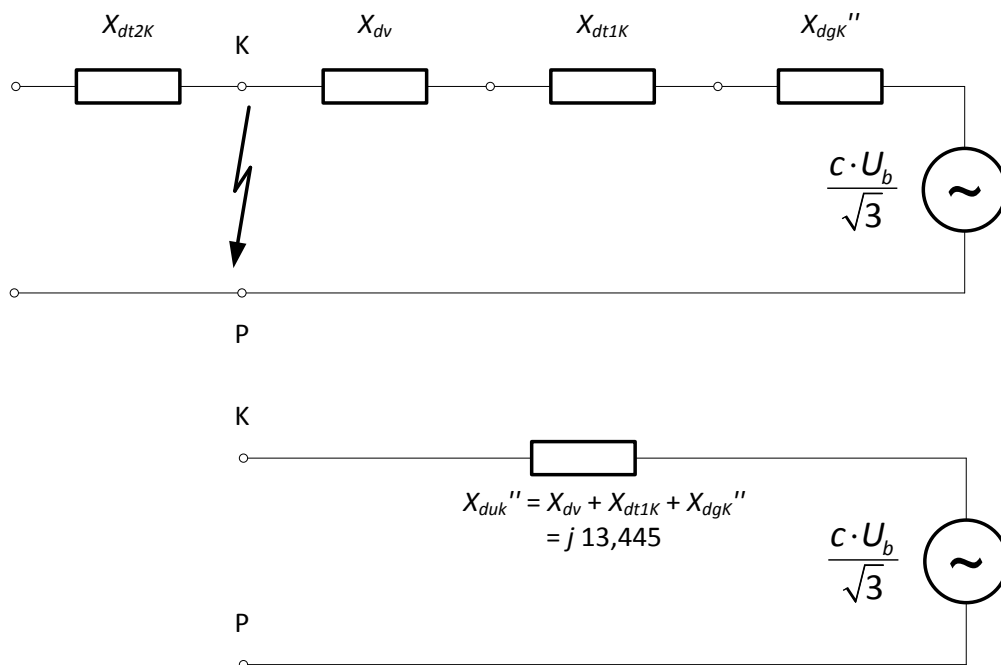
Vod:

$$X_{dv} = X_{iv} = 0,4 \cdot 15 = 6 \, \Omega$$

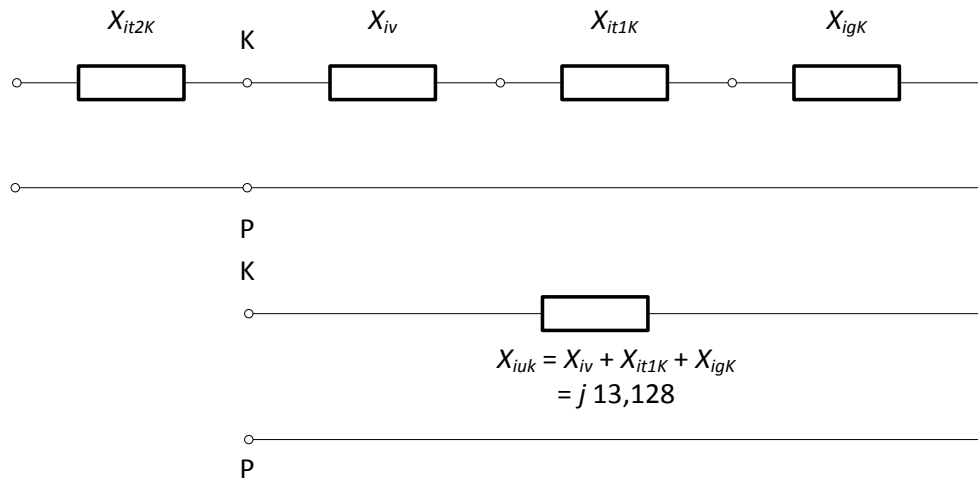
$$X_{0v} = 3X_{dv} = 18 \, \Omega$$

Nema preračunavanja, jer je nazivni napon voda jednak baznomu!

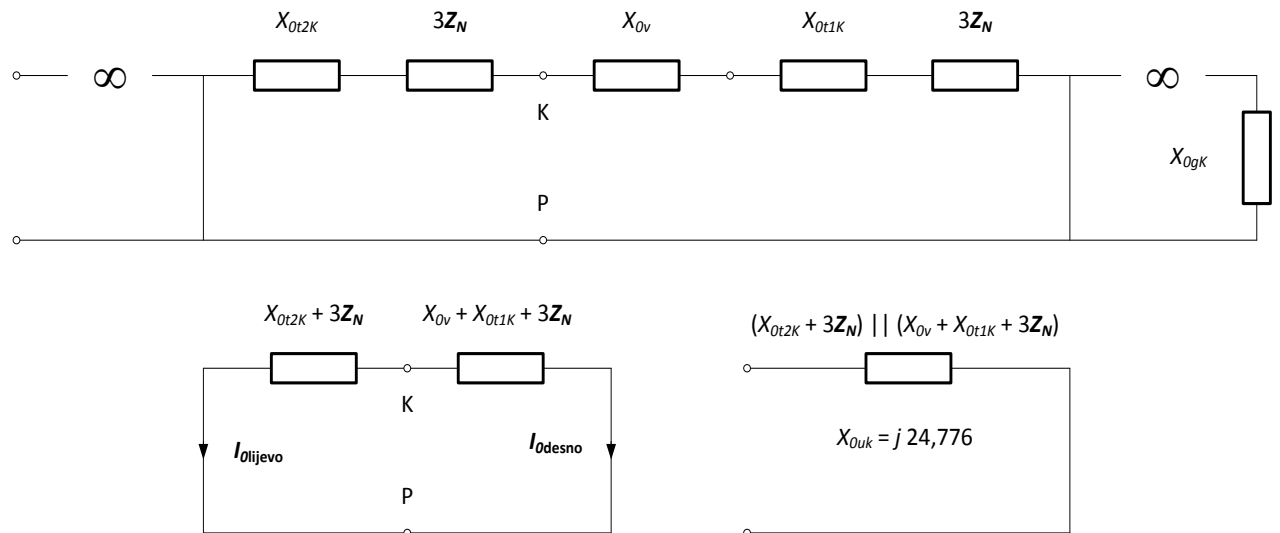
Nadomjesna shema direktnog sustava (početak kratkog spoja):



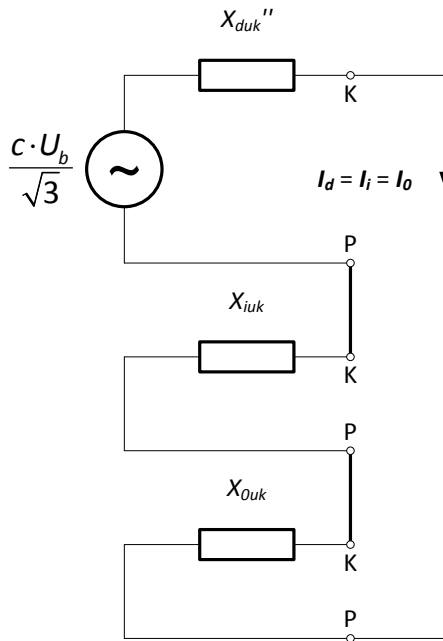
Nadomjesna shema inverznog sustava:



Nadomjesna shema nultog sustava:



Struje jednofaznog KS na mjestu kvara (to su stvarne struje jer je $U_b = U_N$ sabirnice kvara):



$$I_d = I_i = I_o = \frac{35 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot j(13,445 + 13,128 + 24,776)} = -j0,433 \text{ kA}$$

$$I_R = I_d + I_i + I_o = 3I_d = -j1,299 \text{ kA}$$

$$I_S = I_T = 0 \text{ kA}$$

Raspodjela struja po pojedinim elementima:

Vod:

<u>R</u>	<u>S</u>	<u>T</u>
$I_R = I_d + I_i + I_{o\text{desno}}$	$I_S = a^2 I_d + a I_i + I_{o\text{desno}}$	$I_T = a I_d + a^2 I_i + I_{o\text{desno}}$
$I_{o\text{desno}} = I_o \cdot \frac{48,56}{48,56 + 50,587}$	$I_S = I_d(a^2 + a) + I_{o\text{desno}}$	$I_T = I_d(a^2 + a) + I_{o\text{desno}}$
$I_{o\text{desno}} = I_o \cdot 0,49 = -j0,2122 \text{ kA}$	$I_S = -I_d + I_{o\text{desno}} = j0,2208 \text{ kA}$	$I_T = -I_d + I_{o\text{desno}} = j0,2208 \text{ kA}$
$I_R = -j1,078 \text{ kA}$		

Transformator T1:

VN (isto kao vod):

<u>VN - R</u>	<u>VN - S</u>	<u>VN - T</u>
$I_R = -j1,078 \text{ kA}$	$I_S = j0,2208 \text{ kA}$	$I_T = j0,2208 \text{ kA}$

NN (potrebno je preračunati na NN stranu transformatora T1):

$$I_R = (I_d \cdot e^{-j\frac{5\pi}{6}} + I_i \cdot e^{+j\frac{5\pi}{6}} + 0) \cdot \frac{35}{10,5}$$

$$I_R = (1 \angle -150^\circ \cdot 0,433 \angle -90^\circ + 1 \angle 150^\circ \cdot 0,433 \angle -90^\circ) \cdot \frac{35}{10,5}$$

$$I_R = j2,50 \text{ kA}$$

$$I_s = (a^2 I_d \cdot e^{-j\frac{5\pi}{6}} + a I_i \cdot e^{+j\frac{5\pi}{6}} + 0) \cdot \frac{35}{10,5}$$

$$I_s = (1 \angle 240^\circ \cdot 1 \angle -150^\circ \cdot 0,433 \angle -90^\circ + 1 \angle 120^\circ \cdot 1 \angle 150^\circ \cdot 0,433 \angle -90^\circ) \cdot \frac{35}{10,5}$$

$$I_s = 0 \text{ kA}$$

$$I_T = (a I_d \cdot e^{-j\frac{5\pi}{6}} + a^2 I_i \cdot e^{+j\frac{5\pi}{6}} + 0) \cdot \frac{35}{10,5}$$

$$I_T = (1 \angle 120^\circ \cdot 1 \angle -150^\circ \cdot 0,433 \angle -90^\circ + 1 \angle 240^\circ \cdot 1 \angle 150^\circ \cdot 0,433 \angle -90^\circ) \cdot \frac{35}{10,5}$$

$$I_T = -j2,50 \text{ kA}$$

Generator (isto kao na NN strani T1):

$$\begin{array}{ccc} \underline{R} & \underline{S} & \underline{T} \\ I_R = I_{RT1} = j2,50 \text{ kA} & I_S = I_{ST1} = 0 \text{ kA} & I_T = I_{TT1} = -j2,50 \text{ kA} \end{array}$$

Transformator T2:

VN:

$$I_R = 0 + 0 + I_{olijevu} = I_{olijevu} = I_o \cdot \frac{50,587}{48,56 + 50,587} = -j0,2209 \text{ kA}$$

$$I_S = 0 + 0 + I_{olijevu} = -j0,2209 \text{ kA}$$

$$I_T = 0 + 0 + I_{olijevu} = -j0,2209 \text{ kA}$$

NN:

$$I_R = I_S = I_T = 0$$

Naponi na mjestu kvara:

$$\begin{aligned} \underline{\text{Direktni}} \\ V_d &= E_d \cdot \frac{X_{iuk} + X_{0uk}}{X_{duk}'' + X_{iuk} + X_{0uk}} \\ &= \frac{1,1 \cdot 35}{\sqrt{3}} \cdot \frac{j(13,128 + 24,776)}{j51,349} \\ &= 16,408 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\text{Inverzni}} \\ V_i &= -E_d \cdot \frac{X_{iuk}}{X_{duk}'' + X_{iuk} + X_{0uk}} \\ &= \frac{-1,1 \cdot 35}{\sqrt{3}} \cdot \frac{j13,128}{j51,349} \\ &= -5,683 \text{ kV} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{\text{Nulti}} \\ V_o &= -E_d \cdot \frac{X_{0uk}}{X_{duk}'' + X_{iuk} + X_{0uk}} \\ &= \frac{-1,1 \cdot 35}{\sqrt{3}} \cdot \frac{j24,776}{j51,349} \\ &= -10,725 \text{ kV} \end{aligned}$$

Stvarni naponi pojedinih sabirnica:

Sabirnice B (mjesto kvara):

<u>Direktni</u>	<u>Inverzni</u>	<u>Nulti</u>
$V_{dB} = 16,408 \text{ kV}$	$V_{iB} = -5,683 \text{ kV}$	$V_{oB} = -10,725 \text{ kV}$
<u>R</u>	<u>S</u>	<u>I</u>
$V_{RB} = V_{dB} + V_{iB} + V_{oB}$	$V_{SB} = a^2 V_{dB} + a V_{iB} + V_{oB}$	$V_{TB} = a V_{dB} + a^2 V_{iB} + V_{oB}$
$= 16,408 - 5,683 - 10,725$	$= 16,408 \angle 240^\circ - 5,683 \angle 120^\circ - 10,725$	$= 16,408 \angle 120^\circ - 5,683 \angle 240^\circ - 10,725$
$= 0 \text{ kV}$	$= 24,996 \angle 230^\circ \text{ kV}$	$= 24,996 \angle 130^\circ \text{ kV}$

Sabirnice C:

<u>Direktni</u>	<u>Inverzni</u>	<u>Nulti</u>
$V_{dC} = V_{dB} \angle 0^\circ = 16,408 \text{ kV}$	$V_{iC} = V_{iB} \angle 0^\circ = -5,683 \text{ kV}$	$V_{oC} = 0 \text{ kV}$
<u>R</u>	<u>S</u>	<u>I</u>
$V_{RC} = (V_{dC} + V_{iC} + V_{oC}) \cdot \frac{6}{35}$	$V_{SC} = (a^2 V_{dC} + a V_{iC} + V_{oC}) \cdot \frac{6}{35}$	$V_{TC} = (a V_{dC} + a^2 V_{iC} + V_{oC}) \cdot \frac{6}{35}$
$= 1,8386 \text{ kV}$	$= (16,408 \angle 240^\circ - 5,683 \angle 120^\circ) \cdot \frac{6}{35}$	$= (16,408 \angle 120^\circ - 5,683 \angle 240^\circ) \cdot \frac{6}{35}$
	$= 3,4061 \angle 254,34^\circ \text{ kV}$	$= 3,4061 \angle 105,66^\circ \text{ kV}$

Sabirnice A:

<u>Direktni</u>	<u>Inverzni</u>	<u>Nulti</u>
$V_{dA} = V_{dB} + I_d \cdot X_{dv}$	$V_{iA} = V_{iB} + I_i \cdot X_{iv}$	$V_{oA} = V_{oB} + I_{0\text{desno}} \cdot X_{0v}$
$= 19,006 \text{ kV}$	$= -3,085 \text{ kV}$	$= -6,9054 \text{ kV}$

<u>R</u>	<u>S</u>	<u>I</u>
$V_{RA} = (V_{dA} + V_{iA} + V_{oA})$	$V_{SA} = (a^2 V_{dA} + a V_{iA} + V_{oA})$	$V_{TA} = (a V_{dA} + a^2 V_{iA} + V_{oA})$
$= 9,0156 \text{ kV}$	$= 24,228 \angle 232,15^\circ \text{ kV}$	$= 24,228 \angle 127,85^\circ \text{ kV}$

Sabirnice G:

<u>Direktni</u>	<u>Inverzni</u>	<u>Nulti</u>
$V_{dG} = (V_{dA} + I_d \cdot X_{dt1K}) \cdot e^{-j\frac{5\pi}{6}}$ $= 20,126 \angle -150^\circ \text{ kV}$	$V_{iG} = (V_{iA} + I_i \cdot X_{it1K}) \cdot e^{+j\frac{5\pi}{6}}$ $= -1,965 \angle 150^\circ \text{ kV}$	$V_{oG} = V_{oA} + I_{o\text{desno}} \cdot (X_{ot1K} + 3Z_N)$ $= 0 \text{ kV}$

<u>R</u>	<u>S</u>	<u>I</u>
$V_{RG} = (V_{dG} + V_{iG} + V_{oG}) \frac{10,5}{35}$ $= 5,766 \angle 215^\circ \text{ kV}$	$V_{SG} = (a^2 V_{dG} + a V_{iG} + V_{oG}) \frac{10,5}{35}$ $= 6,627 \angle 90^\circ \text{ kV}$	$V_{TG} = (a V_{dG} + a^2 V_{iG} + V_{oG}) \frac{10,5}{35}$ $= 5,766 \angle 325^\circ \text{ kV}$

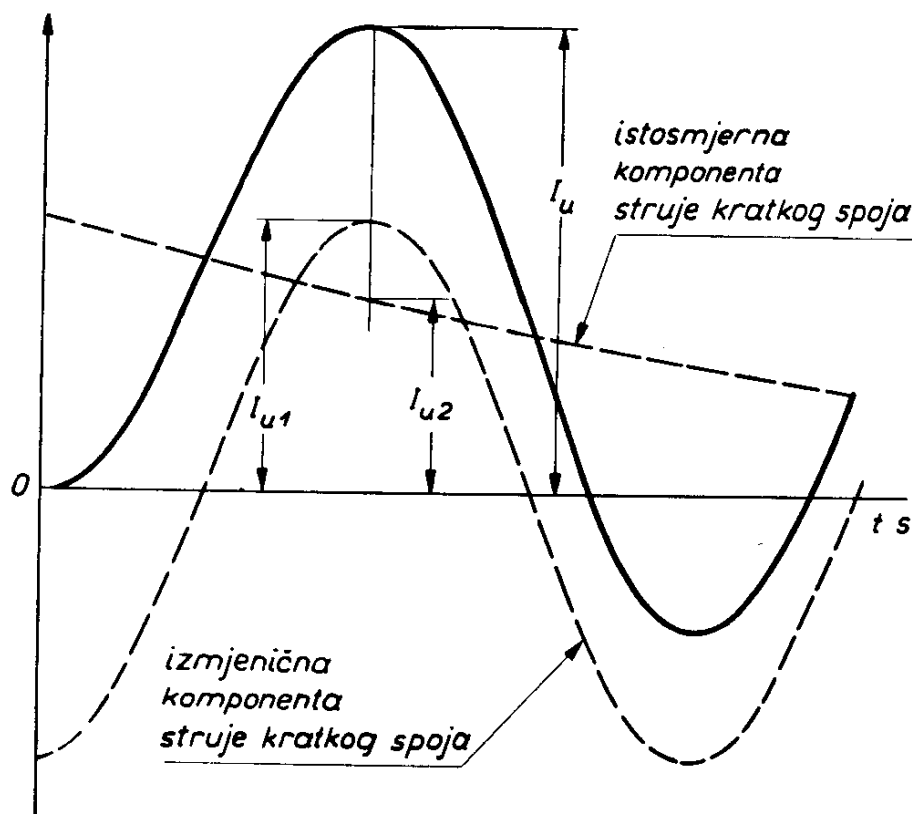
Sabirnice E:

<u>Direktni</u>	<u>Inverzni</u>	<u>Nulti</u>
$V_{dE} = V_{dG} + I_d \cdot e^{-j\frac{5\pi}{6}} \cdot X_{dgK} "$ $= 22,230 \angle -150^\circ \text{ kV}$	$V_{iE} = V_{iG} + I_i \angle 150^\circ \cdot X_{igK}$ $= 0 \text{ kV}$	$V_{oE} = V_{oG} = 0 \text{ kV}$

<u>R</u>	<u>S</u>	<u>I</u>
$V_{RE} = (V_{dE} + V_{iE} + V_{oE}) \frac{10,5}{35}$ $= 6,669 \angle -150^\circ \text{ kV}$	$V_{SE} = (a^2 V_{dE} + a V_{iE} + V_{oE}) \frac{10,5}{35}$ $= 6,669 \angle 90^\circ \text{ kV}$	$V_{TE} = (a V_{dE} + a^2 V_{iE} + V_{oE}) \frac{10,5}{35}$ $= 6,669 \angle -30^\circ \text{ kV}$

13. Udarne struja kratkog spoja

Udarne struja kratkog spoja je maksimalna tjemena vrijednost struje kratkog spoja. Kao što je već poznato, uslijed magnetske tromosti u strojevima s rotacionim dijelovima, struja kratkog spoja sadrži izmjeničnu i istosmjernu komponentu koje se s vremenom prigušuju – istosmjerna do nulte vrijednosti, izmjenična do stacionarne vrijednosti koja je različita od nule.



Slika 12

Najgori slučaj, jest to da najveća će se vrijednost struje kratkog spoja pojaviti, ako kratki spoj nastane u trenutku kada je napon jednak nuli, jer je tada magnetski tok u magnetskom krugu najveći, to jest pojaviti će se najveća istosmjerna komponenta struje kratkog spoja.

Za $R = 0$, što znači da se istosmjerna komponenta struje ne prigušuje s vremenom, udarna će se struja pojaviti polovicu periode (0,01 s) nakon nastanka kratkog spoja.

Za R različito od nule, što znači da se istosmjerna komponenta struje s vremenom prigušuje, udarna će se struja pojaviti ranije ($t_u < 0,01$ s), što ovisi o omjeru R/X . Naime, što je taj omjer veći, to se brže prigušuje istosmjerna komponenta pa se udarna struja pojavljuje prije (smanjuje se t_u).

Zašto nam je interesantna udarna struja?

Poznavanje udarne struje kratkog spoja potrebno je da bi se odredila maksimalna naprezanja dijelova postrojenja, aparata i namota u strojevima, jer te uređaje treba tako dimenzionirati da mogu izdržati ta maksimalna naprezanja uvjetovana udarnom strujom kratkog spoja. U našem slučaju to se odnosi na dimenzioniranje sabirnica i rastavljača.

Određivanje udarne struje kratkog spoja

Trofazni kratki spoj

Kratki spojevi napajani iz mreža koje nisu zamkaste

U slučaju trofaznog kratkog spoja napajanog iz više grana (mreža nije zamkasta) doprinos svake pojedine grane udarnoj struji kratkog spoja se računa prema izrazu:

$$i_u = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_k''$$

Faktor κ ovisan je o omjeru R/X ili X/R impedancije kratkog spoja na promatranoj lokaciji u mreži i može se računati pomoću izraza:

$$\kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X}$$

Ukupna udarna struja kratkog spoja na mjestu kratkog spoja F a koja je napajana iz više grana računa se prema izrazu:

$$i_u = \sum_i i_{ui}$$

Dvofazni kratki spoj

Ako je riječ o dvofaznom kratkom spoju tada se udarna struja kratkog spoja računa pomoću izraza:

$$i_{u2} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2}''$$

Dvofazni kratki spoj sa zemljom

Udarna struja dvofaznog kratkog spoja sa zemljom se računa prema:

$$i_{u2E} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k2E}''$$

Jednofazni kratki spoj

Za jednofazni kratki spoj udarna struja može se izraziti na slijedeći način:

$$i_{u1} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{k1}''$$

...

Radi pojednostavljenja pretpostavlja se da je faktor κ za ove tri vrste kratkog spoja jednak kao i u slučaju trofaznog kratkog spoja.

14. Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja

Struja mjerodavna za ugrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja je efektivna vrijednost struje kratkog spoja. Naime, izmjenična struja proizvodi jednaku toplinu kao i istosmjerna struja iznosa jednakog efektivnoj vrijednosti izmjenične struje. Računa se prema izrazu:

$$I_t = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t i_{KS}^2 dt}$$

gdje je t vrijeme trajanja kratkog spoja.

U literaturi¹⁹ je proveden izvod za slučaj trofaznog kratkog spoja prema kojemu je dobiven izraz :

$$I_t = I_K'' \sqrt{m+n}$$

gdje su:

$$m = f\left(\frac{R}{X_d''}, f \cdot t\right)$$

To je zapravo veličina ovisna o $Z_d'' = R + jX$ za promatrano mjesto kvara u mreži (Z_d'' se odredi iz nadomjesne sheme direktnog sustava za kvar na određenom mjestu, uzimajući u obzir R) i o umnošku $f \cdot t$, t = vrijeme trajanja KS, koje je za promatrano mjesto u mreži određeno postavljenom nadstrujnom relejnom zaštitom.

$$n = f(\sigma_m, t), \left\{ \sigma_m = \frac{I_K''}{I_K} \right\}$$

Ova je veličina ovisna o σ_m za promatrano mjesto kvara u mreži i o t = vrijeme trajanja KS_koje je za promatrano mjesto u mreži određeno postavljenom nadstrujnom relejnom zaštitom.

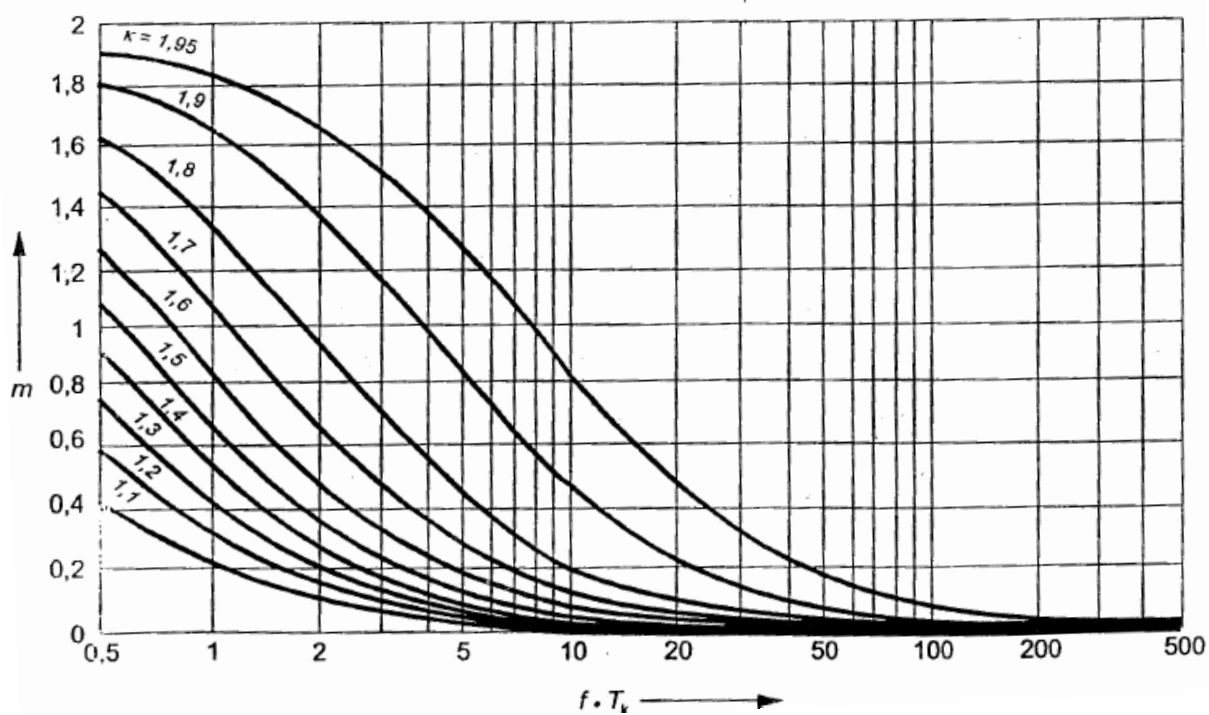
I_K'' – efektivna vrijednost izmjenične komponente struje KS neposredno nakon nastanka KS.

Faktorom m obuhvaćena je vremenska ovisnost toplinskog efekta istosmjerne komponente struje kratkog spoja a faktorom n vremenska ovisnost toplinskog efekta izmjenične komponente struje kratkog spoja.

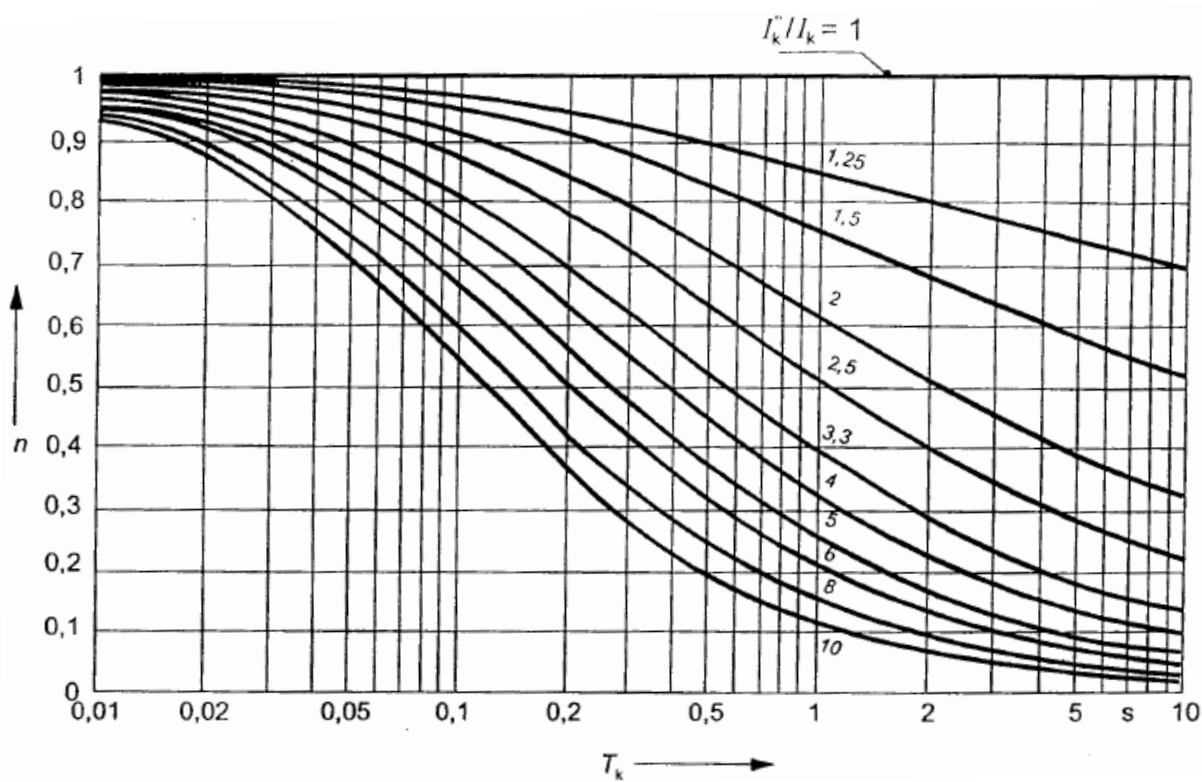
Za distribucijske se mreže (kratki spoj daleko od generatora) obično uzima da je $n = 1$.

Za kratke spojeve daleko od generatora koji traju dulje od 0,5 s dozvoljeno je uzeti da je $m + n = 1$.

¹⁹ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 196-202

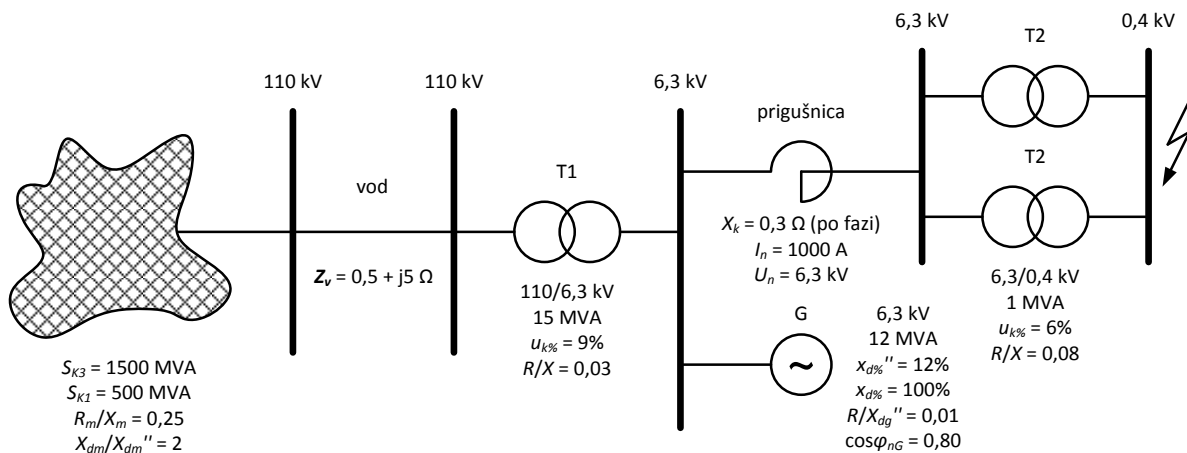


Slika 13



Slika 14

21. Primjer



Rješenje:

U zadatku se izričito traži da se odredi udarna struja $K3$ kao i struja mjerodavna za ugrijavanje u slučaju $K3$. Realno gledano I_{uk3} je u slučaju sabirnica najnepovoljnija (bez obzira što možda nije po iznosu veća od udarnih struja $K1$ ili $K2$). Kada bi se trebala odrediti najnepoželjnija struja mjerodavna za ugrijavanje (I_t), prethodno bi bilo potrebno odrediti vrstu kratkog spoja koja s obzirom na kratki spoj na sabirnicama 0,4 kV ima najveću struju kvara. Budući da se traži I_{tk3} , a ne najnepovoljnija tako ćemo i raditi.

Bazni napon je: $U_b = 0,4 \text{ kV}$.

$$X_{dA.M.}'' = \frac{c \cdot U_b^2}{S_{K3}} = \frac{c \cdot 0,4^2}{1500} = 1,1737 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$X_{dA.M.} = 2 \cdot X_{dA.M.}'' = 2,3474 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Aktivna mreža (A.M.):

$$R_{A.M.} = 0,25 \cdot X_{dA.M.} = 0,58685 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{dA.M.}'' = (0,58685 + j1,1737) \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$\mathbf{Z}_{d4.M} = (0,58685 + j2,3474) \cdot 10^{-4} \Omega$$

Vod:

$$\mathbf{Z}_V = (0,5 + j5) \cdot \left(\frac{0,4}{110} \right)^2 = (6,61 \cdot 10^{-6} + j6,61 \cdot 10^{-5}) \Omega$$

$$X_{dg}'' = \frac{12}{100} \cdot \frac{0,4^2}{12} = 1,6 \cdot 10^{-3} \Omega$$

$$R_g = 0,01 \cdot X_{dg}'' = 1,6 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$Z_{dg}'' = (1,6 \cdot 10^{-5} + j1,6 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{dg} = \frac{100}{100} \cdot \frac{0,4^2}{12} = 133 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{dg} = (1,6 \cdot 10^{-5} + j133 \cdot 10^{-4}) \Omega$$

Generator (G):

$$\sin \varphi_{nG} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{nG}} = \sqrt{1 - 0,80^2} = 0,6$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} = \frac{6,3}{6,3} \cdot \frac{1,1}{1 + 0,12 \cdot 0,6} = 1,026$$

$$Z_{dgK}'' = K_G \cdot Z_{dg}'' = (1,642 \cdot 10^{-5} + j1,642 \cdot 10^{-3}) \Omega$$

$$X_{dT1} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{9}{100} \cdot \frac{0,4^2}{15} = 9,6 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{T1} = 0,03 \cdot X_{dT1} = 2,88 \cdot 10^{-5} \Omega$$

$$Z_{dT1} = (2,88 \cdot 10^{-5} + j9,6 \cdot 10^{-4}) \Omega$$

Transformator (T1):

$$K_{T1} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T1}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,09} = 0,991$$

$$Z_{dT1K} = K_{T1} \cdot Z_{dT1} = (2,854 \cdot 10^{-5} + j9,514 \cdot 10^{-4}) \Omega$$

$$X_{dT2} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{6}{100} \cdot \frac{0,4^2}{1} = 96 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$R_{T2} = 0,08 \cdot X_{dT2} = 7,68 \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{dT2} = (7,68 + j96) \cdot 10^{-4} \Omega$$

Transformator (T2):

$$K_{T2} = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_{T2}} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,06} = 1,009$$

$$Z_{dT2K} = K_{T2} \cdot Z_{dT2} = (7,749 + j96,864) \cdot 10^{-4} \Omega$$

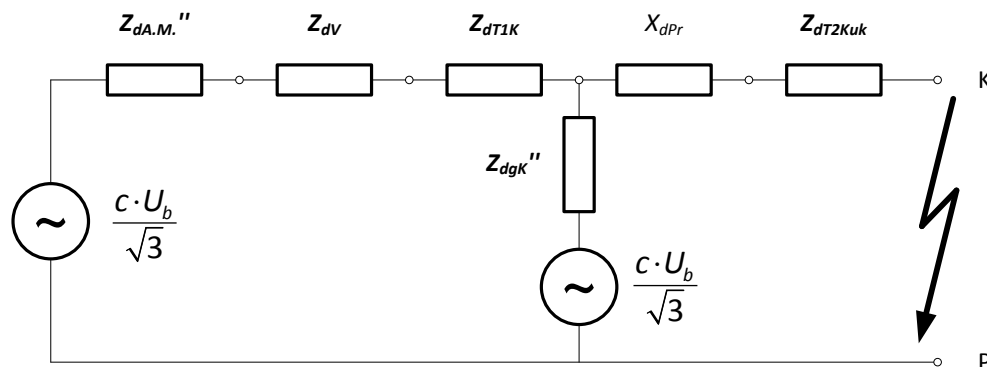
Paralelni spoj dva T2:

$$Z_{dT2Kuk} = \frac{Z_{dT2K}}{2} = (3,875 + j48,432) \cdot 10^{-4} \Omega$$

Prigušnica:

$$X_{dPr} = 0,3 \cdot \left(\frac{0,4^2}{6,3^2} \right) = 12,1 \cdot 10^{-4} \Omega$$

Nadomjesna shema direktnog sustava odmah nakon nastanka kratkog spoja:



$$Z_1 = Z_{dAM}'' + Z_{dv} + Z_{dT1K} = (0,938 + j11,349) \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_2 = Z_1 || Z_{dgK}'' = \frac{Z_1 \cdot Z_{dgK}''}{Z_1 + Z_{dgK}''} = (0,355 + j6,719) \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{duk}'' = Z_2 + X_{dPr} + Z_{dT2Kuk} = (4,230 + j67,251) \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{duk}'' = 6,7384 \cdot 10^{-3} \angle 86,40^\circ \Omega$$

$$\frac{R_{uk}}{X_{uk}} = \frac{4,230}{67,251} = 0,0629 \Rightarrow \kappa = 1,02 + 0,98 \cdot e^{-3R/X} = 1,831$$

$$I_{K3}'' = \frac{\frac{U_b}{\sqrt{3}} \cdot c}{Z_d''} = \frac{0,4 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 6,7384 \cdot 10^{-3}} = 37,699 \text{ kA}$$

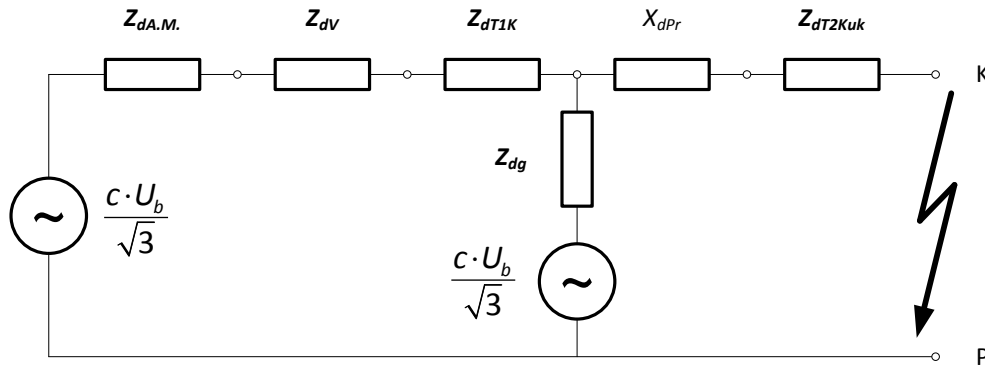
$$I_{uK3} = \kappa \cdot \sqrt{2} \cdot I_{K3}'' = 97,620 \text{ kA}$$

$$I_{tK3} = I_{K3}'' \cdot \sqrt{m+n}$$

$$m = f(k,t) = f(1,831;1,2) \cong 0,1$$

$$n = f\left(\frac{I_{K3}''}{I_{K3}}, t\right) \Rightarrow I_{K3} = ?$$

Nadomjesna shema direktnog sustava za određivanje trajne struje KS-a:



$$Z_1 = Z_{dAM} + Z_{dv} + Z_{dT1K} = (0,938 + j12,522) \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_2 = Z_1 \parallel Z_{dg} = \frac{Z_1 \cdot Z_{dg}}{Z_1 + Z_{dg}} = (0,785 + j11,45) \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{duk} = Z_2 + X_{dPr} + Z_{dT2Kuk} = (4,660 + j71,982) \cdot 10^{-4} \Omega$$

$$Z_{duk} = 7,213 \cdot 10^{-3} \angle 86,3^\circ \Omega$$

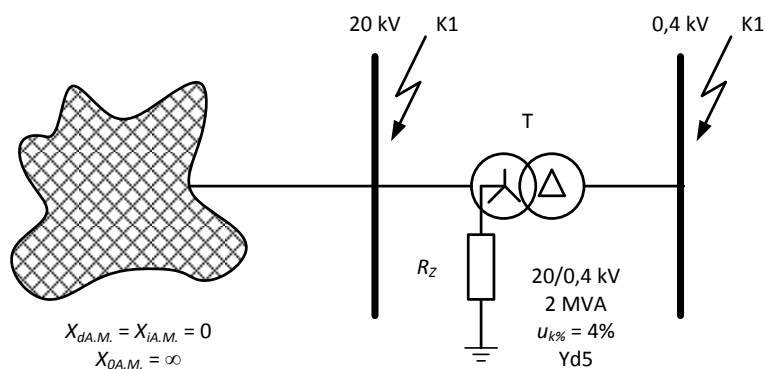
$$I_{K3} = \frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3} \cdot Z_{duk}} = \frac{0,4 \cdot 1,1}{\sqrt{3} \cdot 7,213 \cdot 10^{-3}} = 35,219 \text{ kA}$$

$$\Rightarrow \frac{I_{K3}''}{I_{K3}} = \frac{37,699}{35,219} = 1,070$$

$$n = f(1,070; 1,2) \cong 0,95$$

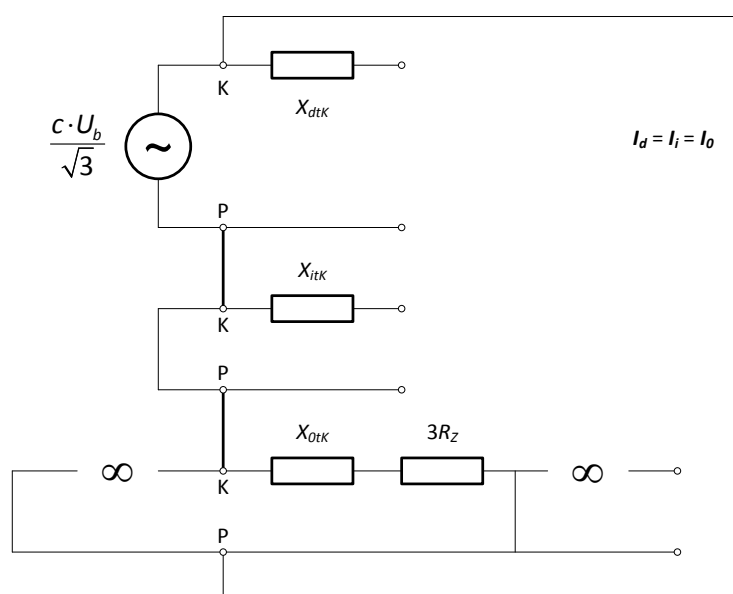
$$I_{tK3} = I_{K3}'' \cdot \sqrt{m+n} = 37,699 \cdot \sqrt{0,1+0,95} = 38,630 \text{ kA}.$$

22. Primjer – Odredite vrijednost omskog otpora za uzemljenje zvjezdišta transformatora sa slike da bi se struja jednofaznog KS ograničila na 300A.



Rješenje:

Nadomjesna shema u slučaju K1 na sabirnici 20 kV:



$$X_{dt} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{4}{100} \cdot \frac{20^2}{2} = 8 \, \Omega$$

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,04} = 1,021$$

$$X_{dtk} = K_T \cdot X_{dt} = 8,164 \, \Omega$$

$$Z_{uk} = 3R_Z + jX_{dtk} = 3R_Z + j8,164 \, \Omega$$

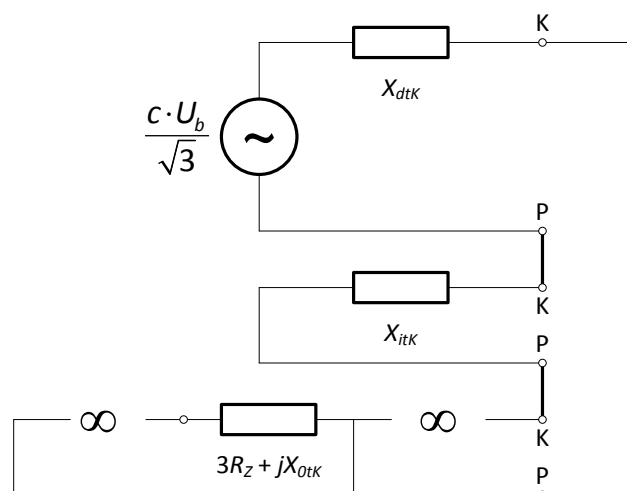
$$I_{K1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_b}{|Z_{uk}|} = \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 20}{\sqrt{9R_z^2 + 8,164^2}} < 300 \cdot 10^{-3} \text{ kA}$$

$$\Rightarrow \sqrt{9R_z^2 + 66,652} > \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 20}{300 \cdot 10^{-3}} = 127,017$$

\Rightarrow

$$R_z > 42,25 \Omega \cong 43 \Omega.$$

Nadomjesna shema u slučaju K1 na sabirnici 0,4 kV:



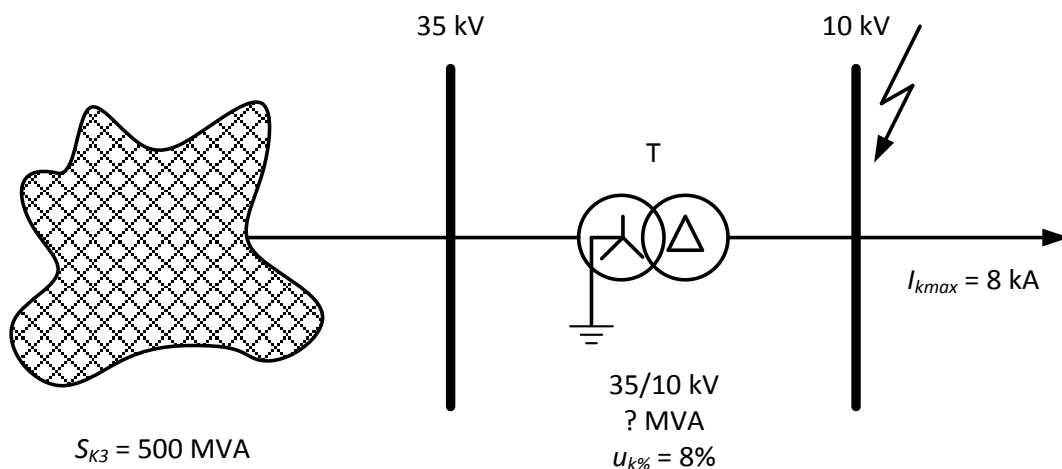
$$Z_{uk} = Z_d + Z_i + Z_o = \infty$$

$$Z_o = \infty$$

$$\Rightarrow I_{K1} = 0$$

Budući da prilikom K1 na sabirnici 0,4 kV struja KS nema kuda teći, vrijednost otpora određena je strujom K1 od maksimalno 300 kA na sabirnici 20 kV. Stoga je tražena vrijednost otpora 43 Ω .

23. Primjer – Koliku maksimalnu snagu transformatora možemo ugraditi u TS 35/10 kV, ako je struja kratkog spoja u 10 kV mreži ograničena na 8 kA?



Rješenje:

Bazni napon je: $U_b = 10 \text{ kV}$.

Aktivna mreža (A.M.):

$$X_{dA.M.}'' = X_{iA.M.} = \frac{c \cdot U_b^2}{S_{K3}} = \frac{1,1 \cdot 10^2}{500} = 0,22 \, \Omega$$

$$X_{0A.M.} = \infty$$

$$X_{dt} = X_{it} = X_{ot} = \frac{8}{100} \cdot \frac{10^2}{S_n} = \frac{8}{S_n} \, \Omega$$

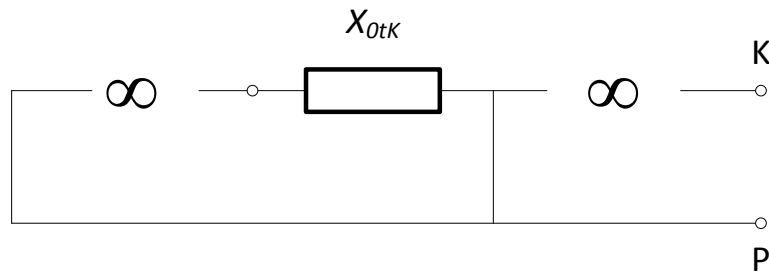
Transformator (T):

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,08} = 0,997$$

$$X_{dtK} = X_{itK} = X_{otK} = K_T \cdot X_{dt} = \frac{7,977}{S_n} \, \Omega$$

Budući da za mrežu vrijedi $Z_d = Z_i$, slijedi da je $\alpha = 1$ pa su K1 ili K3 najnepovoljniji slučajevi.

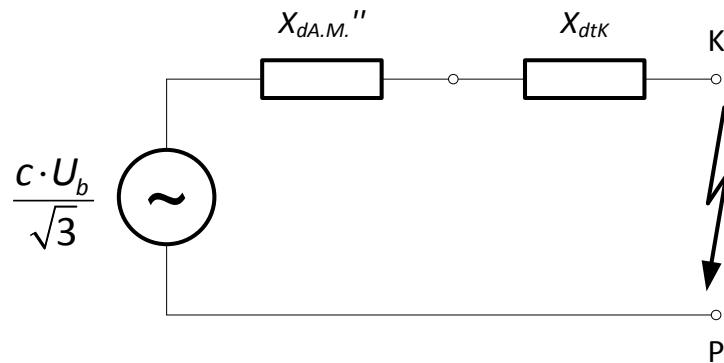
Nulti sustav:



Budući da je nulta impedancija neizmjereno velika, to je $\beta = 0$.

Za $\alpha = 1$ i $\beta = 0$ slijedi da je K3 najnepovoljniji KS za sabirnicu 10 kV.

Direktni sustav:



$$I_K'' = \frac{\frac{10}{\sqrt{3}} \cdot 1,1}{\left| j \left(0,22 + \frac{7,977}{S_n} \right) \right|} < 8 \text{ kA}$$

$$\Rightarrow \frac{11}{8 \cdot \sqrt{3}} < 0,22 + \frac{7,977}{S_n}$$

$$\Rightarrow S_n < 13,90 \text{ MVA}.$$

15. Sabirnice

Sabirnice su elementi rasklopnog postrojenja koji povezuju vodove kojima se dovodi energija s vodovima kojima se ta ista energija dalje odvodi. Dakle svi su vodovi spojeni na sabirnice, zbog čega je za normalan pogon rasklopnog postrojenja od iznimne važnosti odabir odgovarajućih/pouzdatih sabirnica.

Sabirnice se izrađuju od neizoliranih bakrenih ili aluminijskih vodiča. Za unutarnje izvedbe rasklopnih postrojenja do $U_n = 35$ kV dolaze u obzir okrugli, plosnati i U – profili vodiča, dok se za rasklopna postrojenja višeg naponskog nivoa, bez obzira da li su vanjska ili unutarnja, koriste cijevi ili užad.

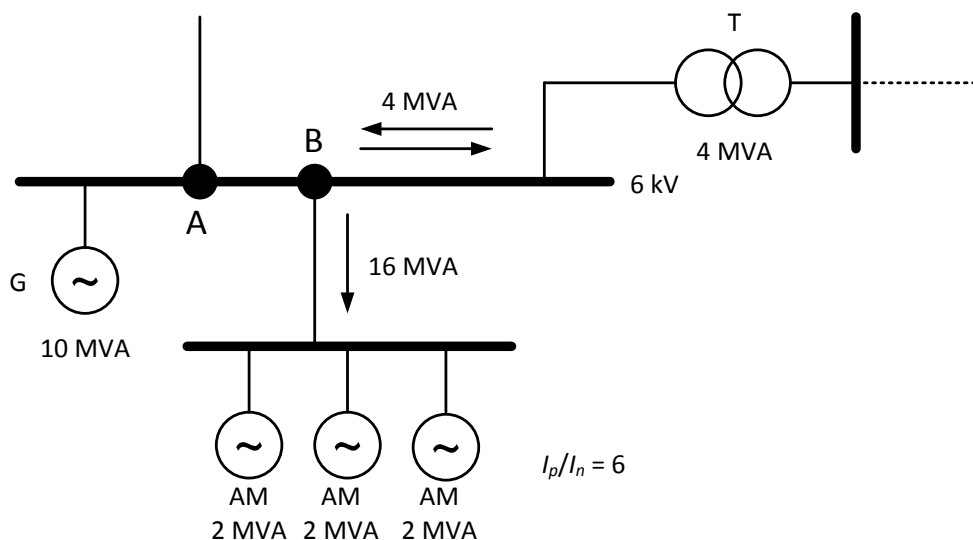
Izbor presjeka sabirnica vrši se prema maksimalnoj mogućoj struji kroz najopterećeniji dio sabirnice u normalnom pogonu. Tako odabrani presjek sabirnica potrebno je kontrolirati s obzirom na:

- 1) zagrijavanje u vremenu trajanja najnepovoljnijeg KS na promatranim sabirnicama (dok ne proradi postavljena zaštita)
- 2) mehanička naprezanja za vrijeme trajanja K3 na promatranim sabirnicama

Dimenzioniranje sabirnice

Kao što je već spomenuto, dimenzioniranje je izbor presjeka sabirnice s obzirom na maksimalnu struju kroz najopterećeniji dio sabirnice u normalnom pogonu – $I_{max.norm}$.

Primjer:



Najgori slučaj je kada se jedan AM upušta u pogon, a ostala dva normalno rade kada se prema motorima prenosi snaga od:

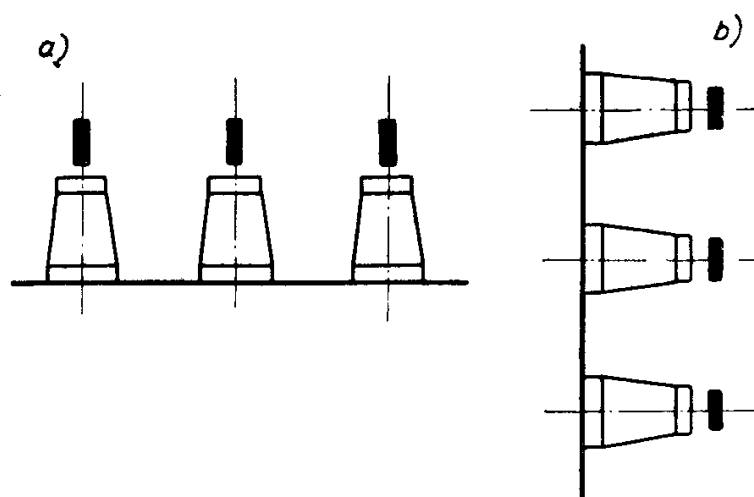
$$1 \cdot 6 \cdot 2 + 2 + 2 = 12 + 4 = 16 \text{ MVA}$$

Tako je najopterećeniji dio sabirnice onaj između odvoda A i B, koji u najgorim uvjetima prenosi 20 MVA pa je maksimalna struja kroz taj dio sabirnice:

$$I_{\text{max.norm}} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 6} = 1,9245 \text{ kA.}$$

Svi podaci o maksimalnim dopuštenim trajnim strujama normalnog pogona za pojedine izvedbe sabirnica navedeni su u literaturi²⁰, ali uz slijedeće pretpostavke:

- a) takvo stanje normalnog pogona beskonačno dugo traje
- b) pri tomu nije dopušteno povećanje temperature sabirnice više od 30°C iznad temperature okoline
- c) da su sabirnice postavljene horizontalno (slika dolje pod a), a ne vertikalno (slika dolje pod b) kad je lošije odvođenje temperature



Slika 15

Naime, ako je dozvoljeno neko drugo nadvišenje temperature sabirnica u odnosu na temperaturu okoline u normalnom pogonu ($\Delta \vartheta$), onda se i dozvoljena struja kroz sabirnicu u normalnom pogonu mijenja prema izrazu:

$$I_{\text{dop}\Delta\vartheta} = I_{30} \cdot \sqrt{\frac{\Delta\vartheta}{30}}.$$

U literaturi²¹ su navedena dopuštena trajna strujna opterećenja za bakrene, aluminijske i olovne nebojane plosnate profile, za okrugle i za U – profile.

Ukoliko pak položaj sabirnica nije horizontalan nego vertikaln, onda je dopušteno strujno opterećenje sabirnica 10 – 15% manje od onog navedenog u literaturi. Podaci navedeni za plosnate

²⁰ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 206-208, tablice 4.1 – 4.5

²¹ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 206, tablice 4.1 i 4.2

profile vrijede samo u slučaju da je dulja stranica profila okomita na površinu poda, a vodiči su međusobno razmaknuti za širinu vodiča. No, ako je dulja stranica plosnatog profila paralelna s površinom poda, potrebno je dopuštena trajna opterećenja navedena u literaturi pomnožiti s korekcijskim faktorom iz literature²² i to zbog lošijeg odvođenja topline.

Profil određen prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu potrebno je kontrolirati s obzirom na zagrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja, te s obzirom na mehaničko naprezanje u slučaju kratko spoja.

Kontrola presjeka sabirnice s obzirom na zagrijavanje za vrijeme KS

Kako za vrijeme trajanja kratkog spoja na sabirnicama, zbog vrlo visokih struja koje njima teku, dolazi u kratkom vremenu do naglog povišenja temperature, to je onda moguće računati kao da se sva Jouleova toplota, bez pojave odvođenja topline u okolinu, troši za zagrijavanje sabirnica.

Struja koje je mjerodavna za zagrijavanje sabirnica je :

$$I_t = I_k \cdot \sqrt{m+n}$$

Označi li se s $\Delta \vartheta$ maksimalno dozvoljeno povišenje temperature sabirnica u odnosu na temperaturu sabirnica u trenutku nastanka KS (ϑ_1) te s c = srednja specifična toplota sabirnica, odnosno s γ = gustoću sredstva od kojeg su sabirnice izvedene, a s ρ specifični otpor sabirnica, onda je potreban presjek sabirnica:

$$q \geq I_t \cdot \sqrt{t} \cdot \sqrt{\frac{\rho}{c \cdot \gamma \cdot \Delta \vartheta}}.$$

Prilikom određivanja specifičnog otpora, potrebno je uzeti u obzir da se on mijenja s promjenom temperature sabirnica i to prema zakonu:

$$\rho'' = \rho' \cdot [1 + \alpha(\vartheta'' - \vartheta')]$$

gdje je:

α = temperaturni koeficijent

ρ' = specifični otpor sabirnica na temperaturi ϑ'

ρ'' = specifični otpor sabirnica na temperaturi ϑ'' .

U gore navedenu relaciju za potreban presjek sabirnica, potrebno je uvrstiti za ρ = srednji specifični otpor između temperature sabirnica u trenutku nastanka KS, ϑ_1 i temperature sabirnica u trenutku prekida struje KS-a, ϑ_2 :

$$\rho = \frac{\rho_1 + \rho_2}{2} = \rho_0 \cdot \left[1 + \alpha \left(\frac{\vartheta_1 + \vartheta_2}{2} - \vartheta_0 \right) \right]$$

²² Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 209, tablica 4.6

Uzmemo li u obzir da je za bakrene sabirnice dopuštena najviša temperatura $\vartheta_{2Cu} = 200^{\circ}\text{C}$, a za aluminijske sabirnice $\vartheta_{2Al} = 180^{\circ}\text{C}$ te da je $\vartheta_1 = 65^{\circ}\text{C}$ temperatura sabirnica u trenutku nastanka KS, odnosno da je u najnepovoljnijem slučaju temperatura okoline $\vartheta_o = 35^{\circ}\text{C}$, onda je:

$$\Delta \vartheta_{Cu} = 200^{\circ}\text{C} - 65^{\circ}\text{C} = 135^{\circ}\text{C}$$

$$\Delta \vartheta_{Al} = 180^{\circ}\text{C} - 65^{\circ}\text{C} = 115^{\circ}\text{C}$$

Uzmu li se u obzir i ostali podaci (γ , c , ρ_o , α) za bakar i aluminij, može se doći do slijedećeg izraza pomoću kojeg se računa potreban presjek za bakrene i aluminijske sabirnice:

$$q_{Cu} \geq 7,5 \cdot I_t \cdot \sqrt{t}, [\text{mm}^2]$$

$$q_{Al} \geq 12,0 \cdot I_t \cdot \sqrt{t}, [\text{mm}^2]$$

Pri tome važno paziti da se iznos struje u gornju formulu uvrštava u kA, kako bi se potreban presjek izračunao u mm^2 .

Kontrola presjeka sabirnice s obzirom na mehanička naprezanja za vrijeme trajanja KS

U literaturi²³ je provedena detaljna analiza sila koje se pojavljuju na pojedine vodiče sabirnica prilikom trofaznog, dvofaznog i dvofaznog KS-a s istovremenim spojem sa zemljom. Analize su pokazale da se najveće sile pojavljuju na srednjem vodiču sabirnica prilikom trofaznog kratkog spoja, uslijed čega su za mehaničko dimenzioniranje sabirnica mjerodavne upravo struje trofaznog kratkog spoja.

Pri tome je **maksimalna trenutna vrijednost sile po jedinici duljine** (sila je funkcija vremena, $f(t)$) srednjeg vodiča sabirnica u slučaju K3:

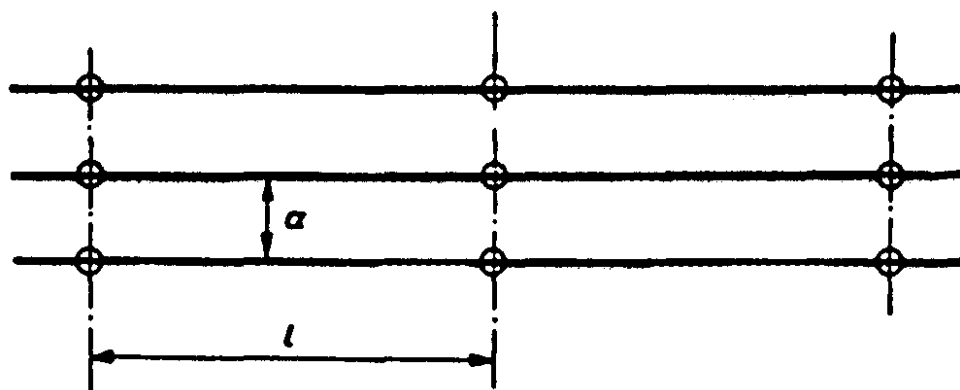
$$f = f_{3s} = 2 \cdot \rho \cdot \frac{(I_{K3})^2}{a} \cdot 10^{-7} \left[\frac{\text{N}}{\text{m}} \right],$$

$$\rho = f(T_a = \frac{X_d}{\omega \cdot R})$$

T_a je vremenska konstanta istosmjerne komponente struje KS-a i moguće ju je odrediti s dijagrama u literaturi²⁴.

²³ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 212-236

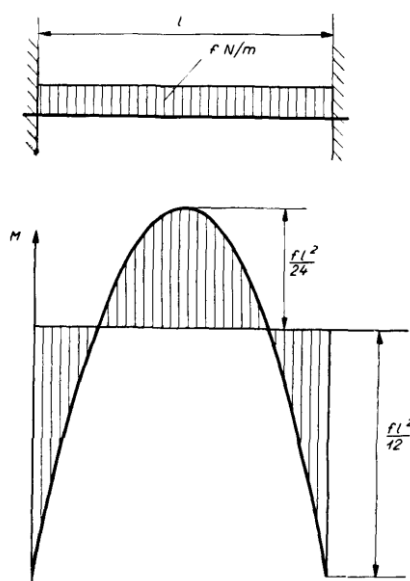
²⁴ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 236, slika 4.25



Slika 16

Sabirnicu možemo promatrati kao uklještenu gredu s jednoliko kontinuiranim opterećenjem.

Razmak među sabirničkim vodičima označen je na slici s a , dok je razmak među sabirničkim osloncima označen sa l i jednak je razmaku među potpornim izolatorima.



Slika 17

Maksimalni moment savijanja javlja se u uklještenjima sabirnice i iznosi:

$$M_{max} = f_{3s} \cdot \frac{l^2}{12} \cdot \nu_s$$

gdje je ν_s frekventni faktor.

Naime, sila koja djeluje na sabirnicu (f_{3s}) nije konstantna, već je vremenski promjenjiva te uzrokuje titranje sabirnice uslijed čega se mijenja i naprezanje u samoj sabirnici. Promjene naprezanja u sabirnici uzimaju se u obzir putem frekventnog faktora. Ovisnost ovog frekventnog faktora o omjeru c_1/c (vlastite frekvencije (c_1) i frekvencije mreže (c)) nalazi se u literaturi²⁵.

Dopušteno sabirničko naprezanje jest do konvencionalne granice tečenja, $\sigma_{0,2}$. To je granično naprezanje, pri kojem trajna deformacija sabirnice ne prelazi 0,2%. Vrijednosti $\sigma_{0,2}$ za pojedine profile sabirnica dane su u literaturi²⁶.

Ako dopustimo da se materijal sabirnice optereti do granice tečenja $\sigma_{0,2}$ po svim dijelovima presjeka onda vrijedi nejednakost prema kojoj je maksimalno dozvoljeno naprezanje vodiča sabirnice kod K3:

$$\sigma = \nu_s \cdot \frac{M_{max}}{W} \leq 2 \cdot \sigma_{0,2}$$

gdje je W moment otpora.

U literaturi²⁷ su naznačene veličine momenata otpora za različite profile sabirnica.

Uobičajena vrijednost ν_s jest 1. No, ako se za tu vrijednost dobije da je $\sigma > 2\sigma_{0,2}$, potrebno je odrediti točan ν_s koji bi, ako je manji od 1, ipak mogao zadovoljiti nejednakost. Za određivanje ν_s potrebno je odrediti vlastitu frekvenciju sabirnice (c_1), što je opisano u literaturi²⁸.

Sva prethodna razmatranja vrijede uz pretpostavku da je sabirnica izvedena samo iz jednog profila. Naime, za veće struje kroz sabirnicu praktično je uzeti sabirnicu sastavljenu od više profila. Kod takvih sastavljenih sabirnica se uz osnovno naprezanje σ , koje je posljedica međusobnog djelovanja struja u svim fazama, javlja i naprezanje σ_1 , koje je posljedica djelovanja struja iste faze samo kroz druge profile koji pripadaju istoj fazi.

Način preračunavanja momenta otpora W složenih profila nalazi se u literaturi²⁹ (obratiti pažnju na pretpostavke o umetcima).

Sila po jedinici duljine na krajnji vodič jedne faze je:

$$f_p = 2 \cdot \left(\frac{I_u}{n} \right)^2 \sum_{j=2}^n \frac{k_{ij}}{a_{ij}} \cdot 10^{-7} \left[\frac{N}{m} \right]$$

$$k_{in} = f \left(\lambda_{in} = \frac{a_{in} - b}{h + b}, \frac{b}{h} \right),$$

gdje su:

I_u = udarna struja K3 na promatranoj sabirnici

n = broj jednakih vodiča od kojih je sastavljena sabirnica

k_{in} = korekcionni faktor kojeg je moguće očitati u literaturi³⁰.

²⁵ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 239, slika 4.29

²⁶ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 243, tablica 4.8

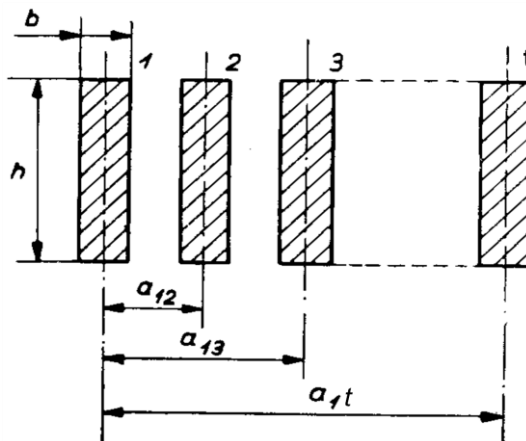
²⁷ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 239-239, slika 4.28 i tablica 4.7

²⁸ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 246

²⁹ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 244, slika 4.32 i 4.33

³⁰ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 219, slika 4.7

U literaturi³¹ su navedene vrijednosti a_{in} i λ_{in} za neke složene profile sabirnica.



Slika 18

Sabirnicu treba dimenzionirati tako da bude zadovoljen sljedeći uvjet.

$$\sigma + \sigma_1 = \frac{(f + f_p) \cdot I^2}{12W} \leq 2 \cdot \sigma_{0,2}$$

Formula za σ_1 vrijedi, ako nema umetaka između vodiča jedne faze. U suprotnom se koristi sljedeća formula:

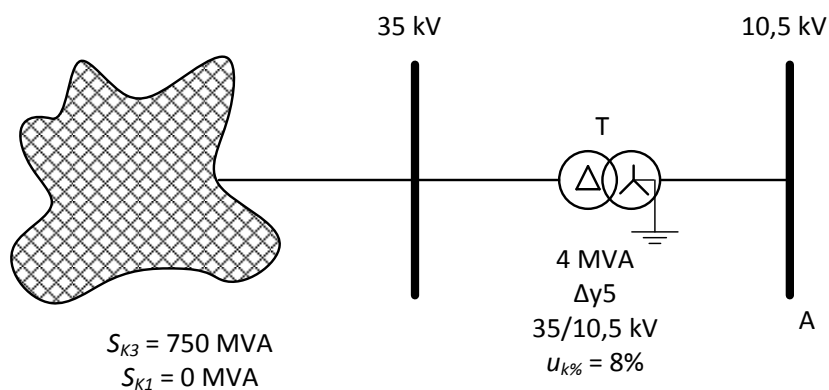
$$\sigma_1 = \frac{f_p}{12W} \cdot \left(\frac{I}{m+1} \right)^2,$$

gdje je m broj umetaka a l razmak potpornih izolatora.

Za presjek sabirnice se odabire najveći od presjeka određenih kontrolom na termička i mehanička naprezanja, ukoliko su veći od onog presjeka dobivenog za normalni pogon.

³¹ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 246, slika 4.35

24. Primjer – Za mrežu prema slici odredite struje mjerodavne za dimensioniranje sabirnica A ($\kappa = 1,8$; $n = 1$; $m = 0$).



Rješenje:

Bazni napon je: $U_b = 10,5 \text{ kV}$.

Aktivna mreža (A.M.):

$$X_{dA.M.}'' = X_{iA.M.} = \frac{c \cdot U_b^2}{S_{K3}} = \frac{1,1 \cdot 10,5^2}{750} = 0,1617 \Omega$$

$$X_{0A.M.} = \infty$$

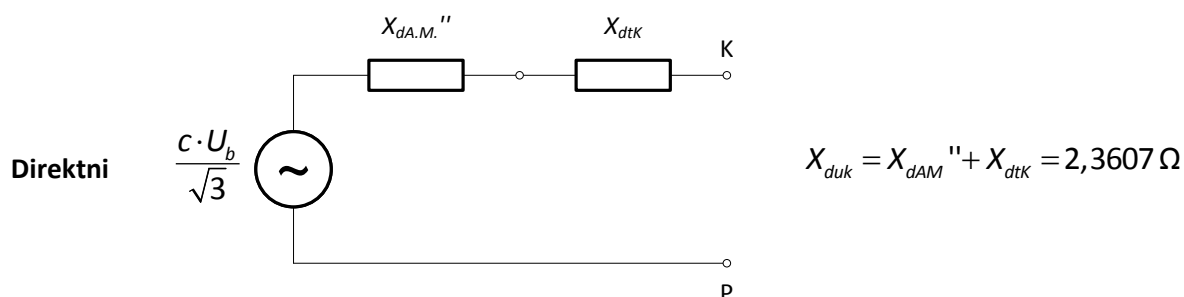
$$X_{dt} = X_{it} = X_{0t} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{8}{100} \cdot \frac{10,5^2}{4} = 2,205 \Omega$$

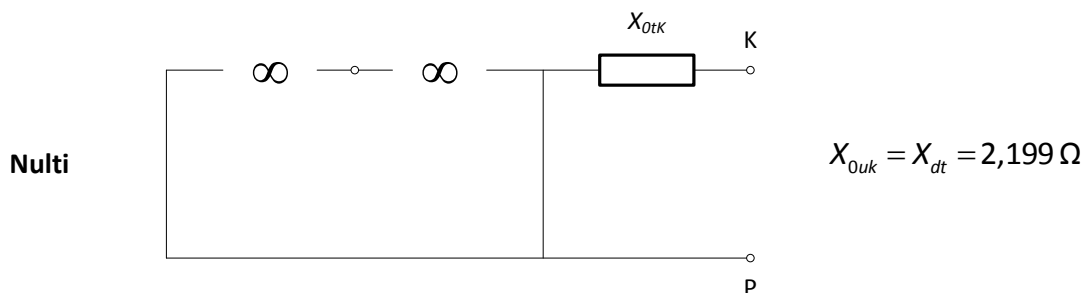
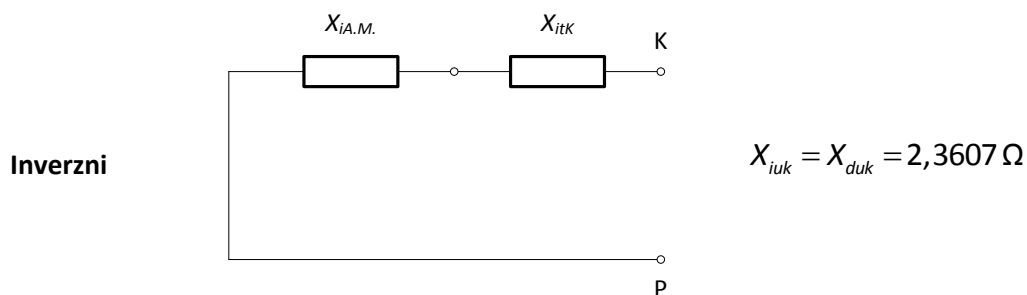
Transformator (T):

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,08} = 0,997$$

$$X_{dtK} = X_{itK} = X_{0tK} = K_T \cdot X_{dt} = 2,199 \Omega$$

Nadomjesne sheme:





$$\alpha = \frac{X_i}{X_d} = 1$$

$$\beta = \frac{X_i}{X_0} = \frac{2,3607}{2,199} = 1,074$$

$$\Rightarrow I_K'' = I_{K1}''$$

$$I_{K1}'' = \frac{\sqrt{3} \cdot U_b \cdot c}{X_{duk} + X_{iuk} + X_{0uk}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 10,5 \cdot 1,1}{2 \cdot 2,3607 + 2,199} = 2,891 \text{ kA}.$$

Maksimalna struja u normalnom pogonu:

$$I_{\max.\text{norm}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{4}{\sqrt{3} \cdot 10,5} = 0,22 \text{ kA}.$$

Struja mjerodavna za ugrijavanje:

$$I_t = I_{K1}'' \cdot \sqrt{m+n} = 2,891 \cdot \sqrt{0+1} = 2,891 \text{ kA}.$$

Mehanička naprezanja:

$$I_{K3}'' = \frac{\frac{U_b}{\sqrt{3}} \cdot c}{X_{duk}} = \frac{\frac{10,5}{\sqrt{3}} \cdot 1,1}{2,3607} = 2,825 \text{ kA} \text{ , (za } f_{3s})$$

$$I_{u_{K3}}'' = I_{K3}'' \cdot \kappa \cdot \sqrt{2} = 2,825 \cdot 1,8 \cdot \sqrt{2} = 7,191 \text{ kA} \text{ , (za } f_p)$$

16. Rastavljači

Rastavljači su elementi rasklopnog postrojenja koji služe za vidno odvajanje dijela rasklopnog postrojenja pod naponom od dijela rasklopnog postrojenja koji nije pod naponom. Njihov je primarni zadatak povećati sigurnost osoblja koje radi u nekom dijelu rasklopnog postrojenja.

Izbor rastavljača vrši se prema:

- a) nazivnom naponu dijela postrojenja u kojemu je ugrađen rastavljač,
- b) maksimalnoj mogućoj struji kroz rastavljač u normalnom pogonu.

Maksimalna moguća struja kroz rastavljač

Maksimalna se moguća struja kroz rastavljač u normalnom pogonu određuje analogno kao i u slučaju sabirnica, znači promotre se svi mogući slučajevi normalnog pogona na temelju čega se onda odredi najveća moguća snaga koja se u normalnom pogonu može prenositi rastavljačem, S_{max} .

Prema tomu je onda maksimalna struja kroz rastavljač u normalnom pogonu jednaka:

$$I_{max} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_n}.$$

Naravno da nazivna struja rastavljača mora biti veća od te maksimalne struje, jer je svaki rastavljač tako dimenzioniran da nazivna struja može njime trajno teći bez da se pri tome rastavljač zagrije preko dopuštene granice. U literaturi³² su navedene nazivne struje rastavljača za razne nazivne napone rastavljača i to onako kako se oni u praksi izvode.

Nakon što je rastavljač odabran prema nazivnoj struji, potrebno je još provjeriti da li odabrani rastavljač zadovoljava s obzirom na :

- c) mehanička naprezanja,
- d) zagrijavanje prilikom trajanja kratkog spoja.

Provjera s obzirom na mehanička naprezanja

Mehaničko naprezanje prema kojemu je potrebno dimenzionirati rastavljač određeno je udarnom strujom kratkog spoja (najveća tjemena vrijednost struje kratkog spoja od njezinog nastanka). Da bi se za neki rastavljač rasklopnog postrojenja mogla odrediti udarna struja KS-a koja je mjerodavna za dimenzioniranje s obzirom na mehanička naprezanja, potrebno je prvenstveno odrediti za koje je mjesto kvara, a potom i za koju vrstu kvara u mreži komponenta struje kvara kroz rastavljač, $I_{K''}$ rastavljača (fazna vrijednost) najveća.

³² Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 262, tablica 4.10

Prema tomu je onda udarna struja kratkog spoja, koja je mjerodavna za dimenzioniranje s obzirom na mehanička naprezanja:

$$I_u = \kappa \cdot I_k'' \cdot \sqrt{2}.$$

gdje je faktor κ uz niz zanemarenja :

$$\kappa = f\left(\frac{R}{X}\right), \quad (Z_d'' = R + jX_d'' = R + jX)$$

Potrebno je dakle odrediti Z_{duk}'' za ono mjesto kvara koje za neku vrstu kvara uzrokuje najveću komponentu struje kvara kroz rastavljač.

Iz literature³³ je potom potrebno provjeriti da li je ta vrijednost udarne struje manja od navedene vrijednosti udarne struje koju prethodno odabrani rastavljač može izdržati. Ukoliko nije zadovoljeno:

$$I_u \leq I_{uTablica}$$

potrebno je odabrati rastavljač veće nazivne struje.

Provjera s obzirom na zagrijavanje za vrijeme kratkog spoja

Struja prema kojoj je potrebno kontrolirati da li rastavljač zadovoljava s obzirom na zagrijavanje prilikom trajanja kratkog spoja jest struja dana izrazom (struja mjerodavna za ugrijavanje):

$$I_t = I_{kr}'' \sqrt{m+n}$$

gdje su:

$$m = f\left(\frac{R}{X_d''}, f \cdot t\right)$$

$Z_{duk}'' = R + jX$ se odredi iz nadomjesne sheme direktnog sustava za slučaj najnepovoljnijeg kvara po rastavljač. t = vrijeme trajanja tog kvara koje je za promatrano mjesto u mreži određeno postavljenom nadstrujnom relejnom zaštitom.

$$n = f(\sigma_m, t), \left\{ \sigma_m = \frac{I_k''}{I_k} \right\}$$

Pri tome su I_k'' i I_k početna i trajna struja kvara kroz sabirnice na kojima (ili u blizini kojih je, ako je u pitanju odvod) je nastao taj najnepovoljniji kvar po rastavljač.

I_{kr}'' – komponenta struje kvara kroz rastavljač u slučaju, za rastavljač, najnepovoljnijeg kvara u mreži (već određeno pod provjerom mehaničkih naprezanja).

³³ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 262, tablica 4.11

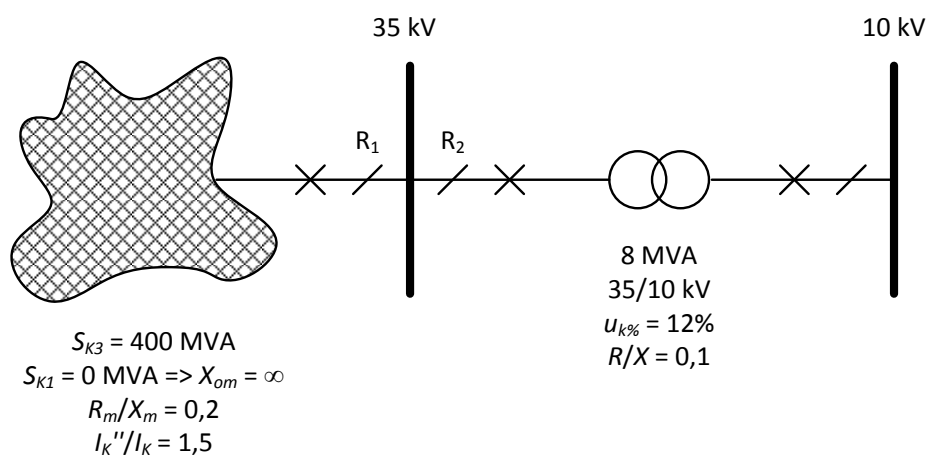
U literaturi³⁴ je potom potrebno provjeriti da li je ta vrijednost struje mjerodavne za ugrijavanje manja od vrijednosti struj mjerodavne za ugrijavanje koju prethodno odabrani rastavljač može izdržati. Ukoliko nije zadovoljeno:

$$I_t \leq I_{t\text{Tablica}} \cdot \sqrt{\frac{1}{t}}$$

potrebno je odabrati rastavljač veće nazivne struje.

Korekcija struje očitane iz tablice s gornjim faktorom (t = vrijeme trajanja KS) potrebna je zato što su vrijednosti struja mjerodavnih za ugrijavanje navedene uz pretpostavku da je trajanje kratkog spoja 1 sekunda.

25. Primjer – Za slučaj prikazan slikom odaberite rastavljač za ugradnju na 35 kV strani. Svi prekidači isklapaju s $t = 0,5$ s.



Rješenje:

- nazivni napon rastavljača: $U_n = 35 \text{ kV}$
- maksimalna struja u normalnom pogonu:

$$I_{max} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{8}{\sqrt{3} \cdot 35} = 0,132 \text{ kA} = 132 \text{ A}.$$

Sada se iz literature³⁵ odabere najbliži odgovarajući rastavljač, a to je:

$$U_n = 35 \text{ kV}; I_n = 400 \text{ A (400 A > 132 A)}.$$

³⁴ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 262, tablica 4.11

³⁵ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 262, tablica 4.10

Kontrola odabranog rastavljača:

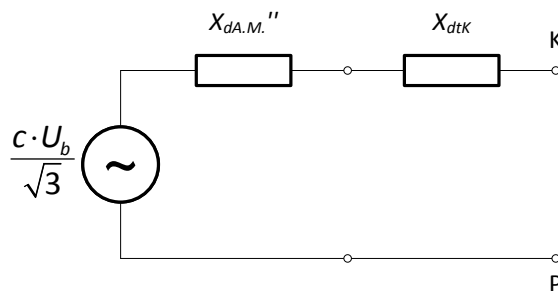
Mehaničko naprezanje:

Budući da je:

$$\alpha = \frac{Z_i}{Z_d} = 1 \quad \text{i} \quad \beta = \frac{Z_i}{Z_o} = 0$$

to je najnepovoljniji kratki spoj po rastavljače R_1 i R_2 sa slike trofazni kratki spoj (K3) na 35 kV sabirnicama.

Nadomjesna shema direktnog sustava:



$$I_{K3}'' = \frac{S_{K3}}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot c} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 35 \cdot 1,1} = 6 \text{ kA} = I_{Kr}''$$

$$\kappa = f\left(\frac{R_m}{X_m} = 0,2\right) = 1,54;$$

$$I_u = 1,54 \cdot \sqrt{2} \cdot 6 = 13,064 \text{ kA}$$

Kako je dobivena udarna struja manja od 35 kA, koliko je navedeno u literaturi³⁶, to odabrani rastavljač zadovoljava po pitanju mehaničkih naprezanja.

Zagrijavanje za vrijeme trajanja KS:

$$I_t = I_{Kr}'' \sqrt{m+n}$$

$$m = f(k = 1,54; t = 0,5 \text{ s}) = 0$$

$$n = f\left(\sigma_m = \frac{I_k''}{I_k} = 1,5; t = 0,5 \text{ s}\right) = 0,88$$

$$I_t = 6 \cdot \sqrt{0+0,88} = 5,628 \text{ kA} < 21 \times \frac{1}{\sqrt{0,5}} = 29,7 \text{ kA}$$

Budući da je i izračunata struja mjerodavna za zagrijavanje manja od korigirane vrijednosti iz literature moguće je ugraditi na mjesta R_1 i R_2 promatrani rastavljač:

$$U_n = 35 \text{ kV}; I_n = 400 \text{ A} (400 \text{ A} > 132 \text{ A}).$$

³⁶ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 262, tablica 4.11

17. Sklopke/prekidači

Izbor sklopki/prekidača vrši se prema:

- a) nazivnom naponu dijela postrojenja u kojemu se sklopka/prekidač ugrađuje
- b) nazivnoj struji – mora biti veća od maksimalne moguće struje kroz sklopku/prekidač u normalnom pogonu (u tom se slučaju u niti jednom slučaju normalnog pogona neće sklopka/prekidač zagrijati preko dozvoljene granice), tj:

$$I_n \geq \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

- c) rasklopnoj snazi, odnosno nazivnoj rasklopnoj moći sklopke/prekidača.

Rasklopna moć trofazne sklopke/prekidača definirana je kao zbroj rasklopnih moći triju polova. Budući da su polovi međusobno jednaki te je svaki od polova dimenzioniran tako da može isklopiti najveću struju kratkog spoja koja se u mreži kroz sklopku/prekidač može javiti, to je onda rasklopna moć sklopke:

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_r$$

gdje je I_r = rasklopna struja = efektivna vrijednost najjače (najnepovoljnije) struje KS, koja protječe sklopkom/prekidačem u trenutku otvaranja kontakata.

Računa se prema izrazu:

$$I_r = \sqrt{I_k'^2 + I_a^2}$$

gdje je:

I_k' = efektivna vrijednost izmjenične struje kratkog spoja po sklopku/prekidač,

I_a = istosmjerna komponenta struje najnepovoljnijeg kratkog spoja po sklopku/prekidač, u trenutku otvaranja kontakata.

Redovito se prilikom određivanja rasklopne struje kratkog spoja posebno ne određuje istosmjerna komponenta struje kratkog spoja u trenutku otvaranja kontakata, već se vrijednost I_k' množi s nekim faktorom koji je, ovisno o vremenu koje protekne do trenutka otvaranja kontakata, veći ili manji od 1.

Faktor je veći od 1, ako se radi o kratkom vremenu koje protekne do trenutka otvaranja kontakata (slabo se priguši istosmjerna komponenta dok izmjenična komponenta ostaje i dalje određena početnom impendancijom Z'' a ne sa Z' ili Z).

Faktor je manji od 1, ako se radi o dugom vremenu koje protekne do trenutka otvaranja kontakata (istosmjerna komponenta se gotovo u potpunosti priguši dok se izmjenična komponenta priguši tako da za njen proračun realno nije mjerodavna impedancija Z'' što se I uzima u obzir množenjem sa faktorom < 1).

Određivanje najnepovoljnijeg KS za određivanje rasklopne moći prekidača/sklopke

Kada se određuje koja vrsta kratkog spoja je najnepovoljnija po neku sklopku/prekidač, potrebno je prethodno odrediti za koje mjesto kvara u mreži (u našem slučaju riječ je o sabirnici) će struja kvara, koja teče sklopkom, biti najveća. Za to je onda mjesto kvara u mreži potrebno, iz direktne, inverzne i nulte nadomjesne sheme odrediti Z_d , Z_i i Z_0 , odnosno:

$$\alpha = \frac{Z_i}{Z_d}; \beta = \frac{Z_i}{Z_0},$$

te iz literature³⁷ odrediti vrstu najnepovoljnijeg kvara.

S obzirom na to o kojoj je vrsti kratkog spoja riječ, rasklopna snaga sklopke/prekidača se računa prema izrazima:

$$\textbf{K1:} \quad S_{K1} = S_r = \frac{3 \cdot c \cdot U_n^2}{X_d'' + X_i + X_0}$$

$$\textbf{K2:} \quad S_{K2} = S_r = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_n^2}{X_d'' + X_i}$$

$$\textbf{K3:} \quad S_{K3} = S_r = \frac{c \cdot U_n^2}{X_d''}$$

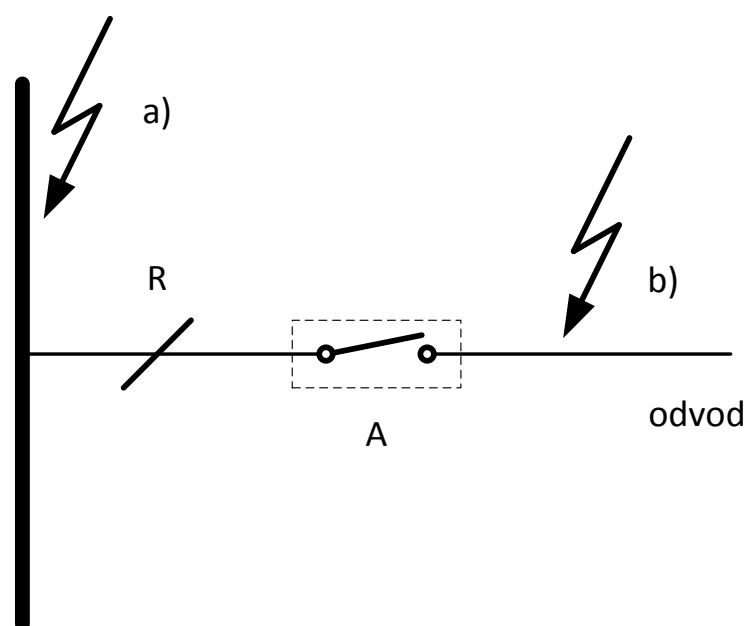
³⁷ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 167, slika 3.56

Izbor mjesta KS za određivanje rasklopne snage sklopke/prekidača

Teorija koja je ovdje iznešena odnosi se i na izbor mjesta kvara mjerodavnog za dimenzioniranje rastavljača.

Prilikom dimenzioniranja sklopki/prekidača, kao i rastavljača, vodi se računa o tome da sklopni aparat bude sposoban iskopiti najveću struju koja se u promatranoj mreži, ovisno o mjestu kvara, može kroz sklopni aparat zatvoriti. Sve što će biti navedeno za sklopke/prekidače vrijedit će identično i za rastavljače.

Uobičajeno je za svaki sklopni aparat A promatrati dva slučaja kvara:



Slika 19

- a) pretpostavlja se da je kratki spoj nastao na sabirnicama na koje je sklopni aparat priključen
- b) pretpostavlja se da je kratki spoj nastao na odvodu neposredno pored sklopke, ali na suprotnoj strani sabirnica.

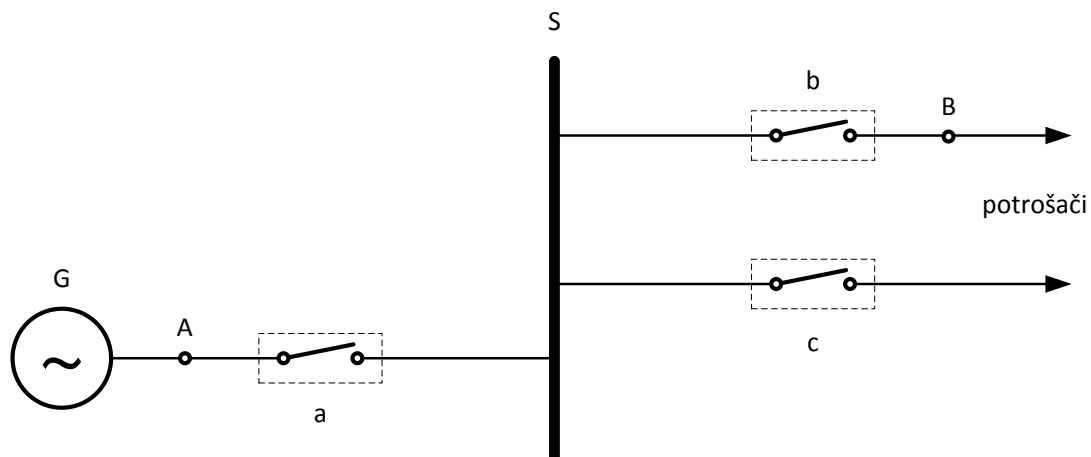
Veća struja kvara kroz sklopku u ova dva slučaja je struja kvara prema kojoj se onda kod:

- rastavljača određuje: I_n i I_r
- sklopki/prekidača određuje: S_n , I_r .

U nastavku teksta biti će navedena dva primjera koji zorno ukazuju kako je potrebno, ovisno o slučaju rasklopnog postrojenja, odabrati mjesto kvara mjerodavnog za dimenzioniranje sklopki/prekidača i rastavljača (literatura³⁸).

³⁸ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 182 - 188

Primjer 1:



a) dimenzioniranje sklopke "a":

- 1) kvar na mjestu A - nema struje
- 2) kvar na sabirnici S - ima struje

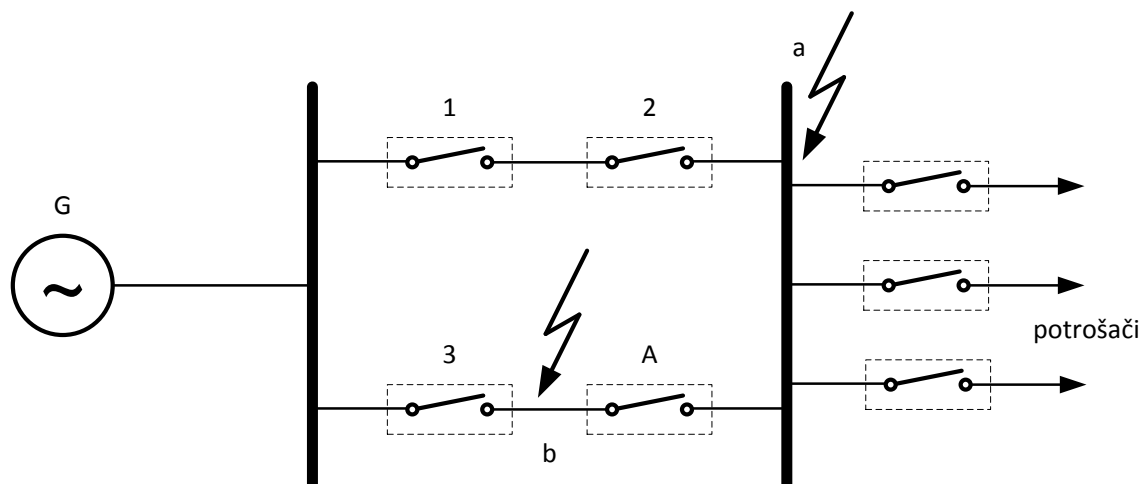
Za sklopku "a" mjerodavan je kvar na sabirnici S

b) dimenzioniranje sklopke "b":

- 1) kvar na sabirnici S - nema struje
- 2) kvar na mjestu B - struja koja po iznosu približno odgovara struji kvara, za kvar na sabirnici S

Prema tome za sklopke "b" i "c" mjerodavano je mjesto kvara u odvodu, čiju struju kroz sklopku računamo kao da se radi o kvaru na sabirnici S.

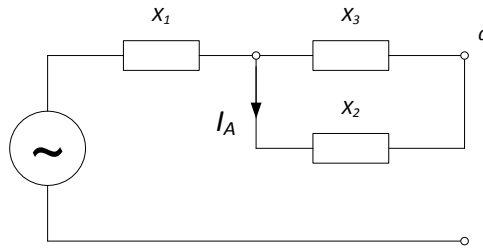
Primjer 2:



Dimenzionira se sklopka "A" i stoga se promatraju slijedeća dva mjesta kvara:

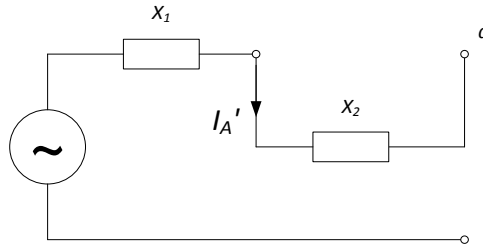
1) Kvar na sabirnici, mjesto kvara "a"

1. slučaj – zatvoreni svi prekidači:



$$I_A = \frac{V}{X_1 + X_2 + \frac{X_1 \cdot X_2}{X_3}}$$

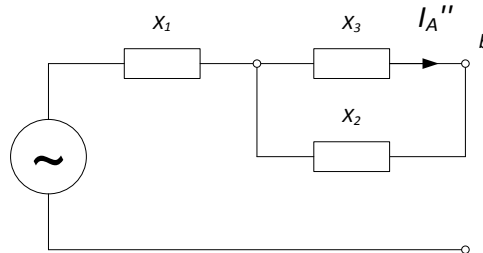
2. slučaj – otvoren prekidač 1 ili 2 ili oba:



$$I_A' = \frac{V}{X_1 + X_2} > I_A$$

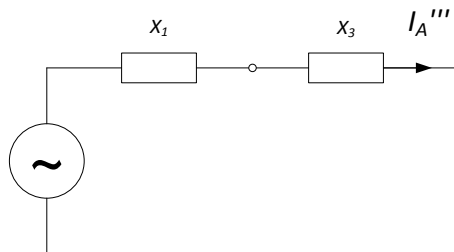
2) Kvar u odvodu, mjesto kvara "b"

1. slučaj – zatvoreni svi prekidači:



$$I_A'' = \frac{V}{X_1 + X_3 + \frac{X_1 \cdot X_3}{X_2}}$$

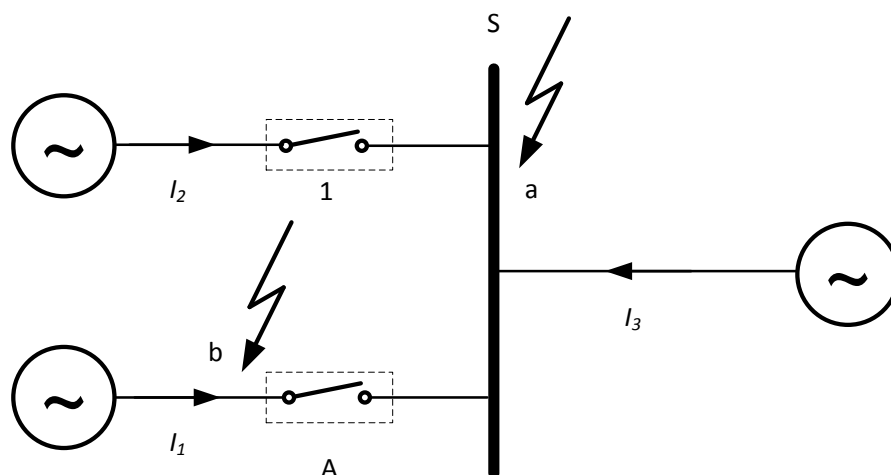
2. slučaj – otvoren prekidač 3:



$$I_A''' = \frac{V}{X_1 + X_3} > I_A'', I_A$$

Očigledno je da će o izboru mjesta kvara odlučiti odnos struja I_A' i I_A''' , tj. ako je veća struja I_A' tada je mjerodavan kvar na sabirnici (mjesto kvara "a"), a ako je veća struja I_A''' mjerodavan je kvar u odvodu (mjesto kvara "b").

Primjer 3:



Dimenzionira se sklopka "A" i stoga se promatraju slijedeća dva mjesta kvara:

- 1) **kvar na sabirnici, mjesto kvara "a"**: sklopkom A teče struja I_1 ;
- 2) **kvar u odvodu, mjesto kvara "b"**: sklopkom A teče zbroj struja $I_2 + I_3$.

Ukoliko je $I_1 > I_2 + I_3$, mjerodavno je mjesto kvara na sabirnici S (mjesto kvara "a"), a inače u odvodu (mjesto kvara "b").

Kako su u praksi redovito, što je veći nazivni napon sklopke/prekidača, mali brojevi različitih rasklopnih snaga, to je onda moguće kao mjesto kvara uzimati kratki spoj na sabirnicama, a rasklopnu snagu sklopke/prekidača prvu veću snagu od snage;

$$S = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_r$$

Takvu odluku dodatno potkrepljuje i činjenica da je zgodno u postrojenjima ugrađivati jednake sklopne aparate, poradi mogućnosti njihove jednostavne zamjene.

Standard za određivanje rasklopne moći sklopki/prekidača

Prekidna struja na mjestu kratkog spoja sastoji se od simetrične prekidne struje I_r i istosmjerne struje u trenutku t_{min} .

Kratki spoj daleko od generatora

Za slučaj kratkih spojeva koji su daleko od generatora, prekidna struja kratkog spoja je jednaka početnoj struji kratkog spoja:

$$\begin{aligned}I_r &= I_k'' \\I_{r2} &= I_{k2}'' \\I_{r2Z} &= I_{k2Z}'' \\I_{r1} &= I_{k1}''\end{aligned}$$

Kratki spoj blizu generatora

U slučaju kratkog spoja u blizini generatora u obzir se uzima i prigušenje simetrične prekidne struje kratkog spoja i to pomoću faktora μ prema izrazu:

$$I_r = \mu \cdot I_k''$$

Faktor μ ovisi o minimalnom vremenu kašnjenja t_{min} kao i o omjeru početne struje kratkog spoja generatora (I_{kG}'') i njegove nazivne struje (I_{nG})

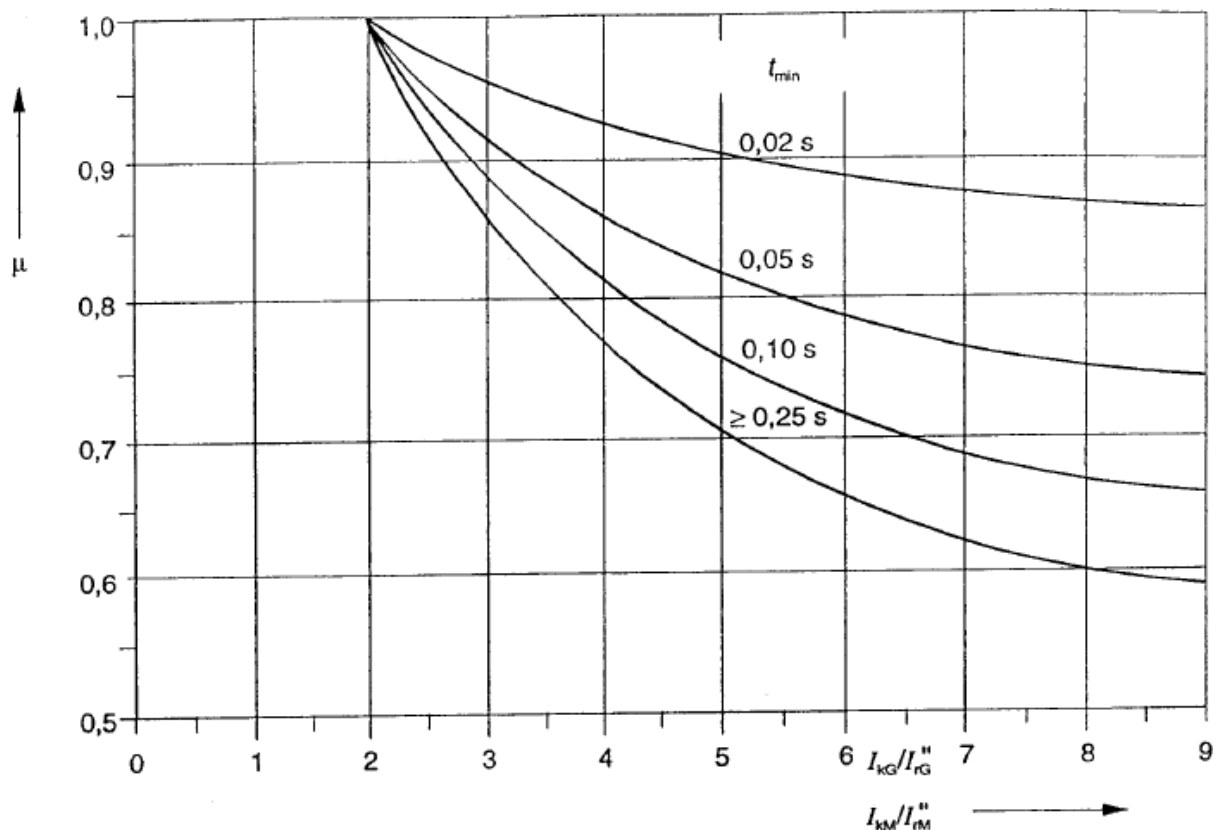
Ukoliko se između mjesta kvara i generatora nalazi blok transformator, tada se parcijalna struja kratkog spoja I_{kS}'' na VN strani transformatora treba preračunati na naponsku razinu generatora koristeći nazivni prijenosni omjer transformatora:

$$I_{kG}'' = t_n \cdot I_{kS}''$$

Faktor μ se računa pomoću slijedećih jednačbi:

$$\begin{aligned}\mu &= 0,84 + 0,26 \cdot e^{-0,26 I_{kG}'' / I_{nG}} & \text{uz} & \quad t_{min} = 0,02 \text{ s} \\ \mu &= 0,71 + 0,51 \cdot e^{-0,30 I_{kG}'' / I_{nG}} & \text{uz} & \quad t_{min} = 0,05 \text{ s} \\ \mu &= 0,62 + 0,72 \cdot e^{-0,32 I_{kG}'' / I_{nG}} & \text{uz} & \quad t_{min} = 0,10 \text{ s} \\ \mu &= 0,56 + 0,94 \cdot e^{-0,38 I_{kG}'' / I_{nG}} & \text{uz} & \quad t_{min} \geq 0,25 \text{ s}\end{aligned}$$

Ukoliko je omjer početne struje kratkog spoja generatora i njegove nazivne struje manji ili jednak 2 tada se bez obzira na vrijeme kašnjenja uzima da je $\mu = 1$.



Slika 20 Dijagram za određivanje faktora μ

Ako se računa doprinos asinkronih motora prekidnoj struji kratkog spoja tada se za određivanje faktora μ umjesto omjera početne struje kratkog spoja generatora (I_{kG}'') i njegove nazivne struje (I_{nG}) koristi omjer početne struje kratkog spoja motora (I_{kM}'') i njegove nazivne struje (I_{nM}).

Doprinos asinkronih motora prekidnoj struji kratkog spoja se određuje tako da se početna struja kratkog spoja motora pomnoži sa faktorima μ i q . Faktor q se određuje pomoću slijedećih izraza:

$$q = 1,03 + 0,12 \cdot \ln(P_{nM}/p) \quad \text{uz} \quad t_{\min} = 0,02 \text{ s}$$

$$q = 0,79 + 0,12 \cdot \ln(P_{nM}/p) \quad \text{uz} \quad t_{\min} = 0,05 \text{ s}$$

$$q = 0,57 + 0,12 \cdot \ln(P_{nM}/p) \quad \text{uz} \quad t_{\min} = 0,10 \text{ s}$$

$$q = 0,26 + 0,10 \cdot \ln(P_{nM}/p) \quad \text{uz} \quad t_{\min} \geq 0,25 \text{ s}$$

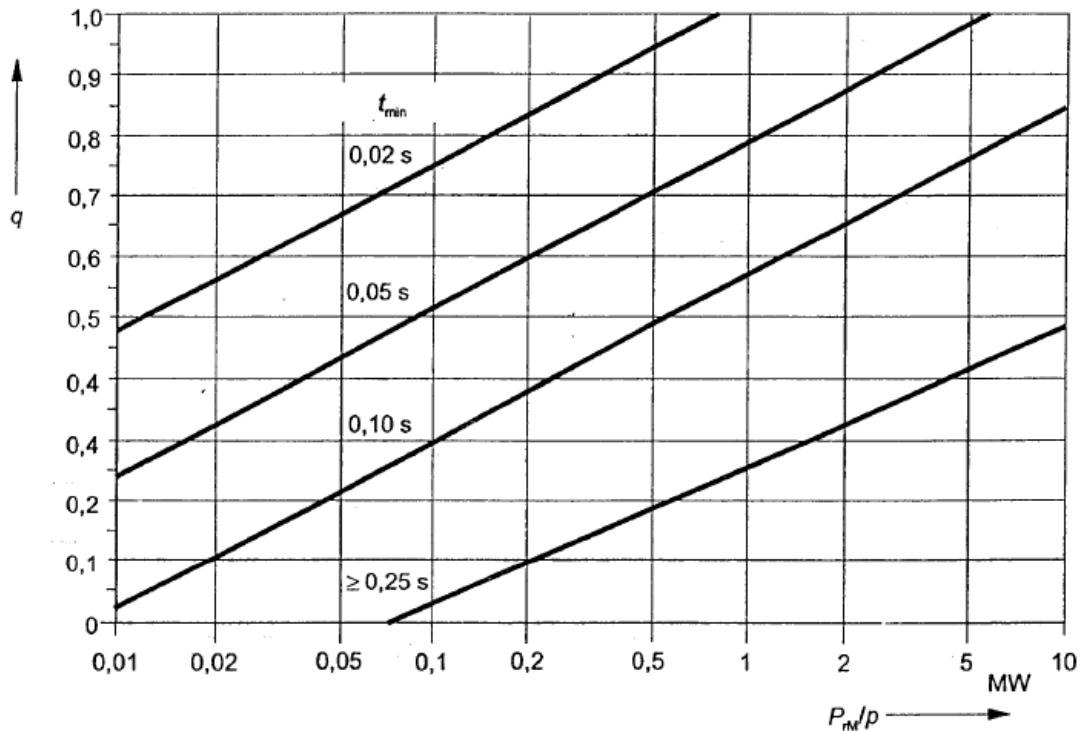
gdje su:

P_{nM} – nazivna djelatna snaga motora u MW;

p – broj pari polova motora.

Ukoliko se korištenjem gornjih relacija dobije vrijednost faktora q veća od 1 tada se uzima da je faktor $q = 1$.

Faktor q može se odrediti i pomoću slijedeće slike.



Slika 21 Dijagram za određivanje faktora q

Trofazni kratki spoj u zamkastim mrežama

Prekidna struja I_r u zamkastim mrežama može se odrediti pomoću izraza:

$$I_r = I_k'' \quad (1)$$

Struje dobivene relacijom (68) veće su nego stvarne simetrične prekidne struje kratkog spoja.

Nesimetrični kratki spojevi

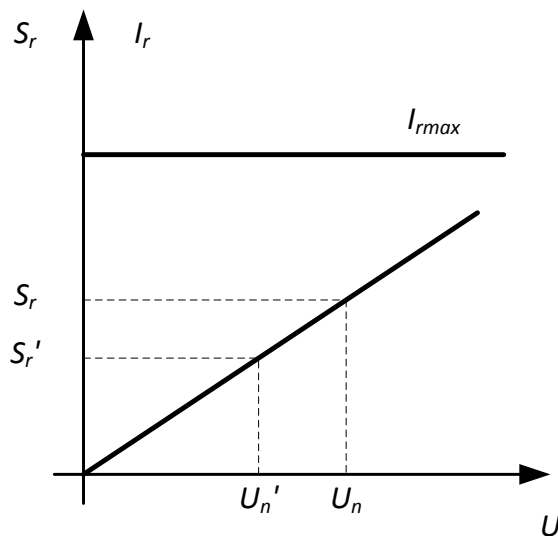
Kod nesimetričnih kratkih spojeva ne uzima se u obzir prigušenje toka u generatorima pa se pretpostavlja da je prekidna struja jednaka početnoj struji kratkog spoja.

Pri tome je važno naglasiti da je sklopku određenog nazivnog napona moguće ugraditi u mrežu nižeg naponskog nivoa, no pri tome pada njezina rasklopna moć. Kada bi rasklopna moć pri sniženom naponu ostala ista, to bi značilo da bi se povećala rasklopna struja koju bi sklopka morala moći prekinuti. No kako je najveća rasklopna struja koju sklopka može prekinuti određena nazivnim naponom i nazivnom rasklopnom moći sklopke,

$$I_{rmax} = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

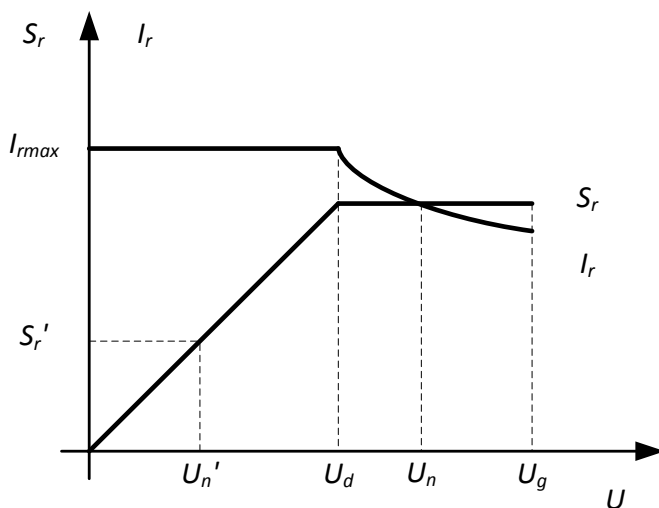
to je onda rasklopna moć sklopke koja radi pri sniženom naponu $U_n' < U_n$ jednaka:

$$I_{rmax} = \text{konst.} = \frac{S_r}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{S_r'}{\sqrt{3} \cdot U_n'} \Rightarrow S_r' = S_r \cdot \frac{U_n'}{U_n}$$



Slika 22

Prema njemačkim (DIN) normama vrijedi da sklopka ima nazivnu moć, ne samo pri nazivnom naponu U_n , nego i unutar nekog intervala $U_n \in [U_d, U_g]$. To onda znači da unutar tog intervala, sa smanjenjem napona na kojem radi sklopka nazivnog napona U_n , raste njena rasklopna struja do vrijednosti I_{rmax} koja odgovara naponu U_d . S daljnjim padom radnog napona sklopke (ispod donje granice) na raste više rasklopna struja već ona ostaje ista što za posljedicu ima smanjenje rasklopne moći sklopke.



Slika 23

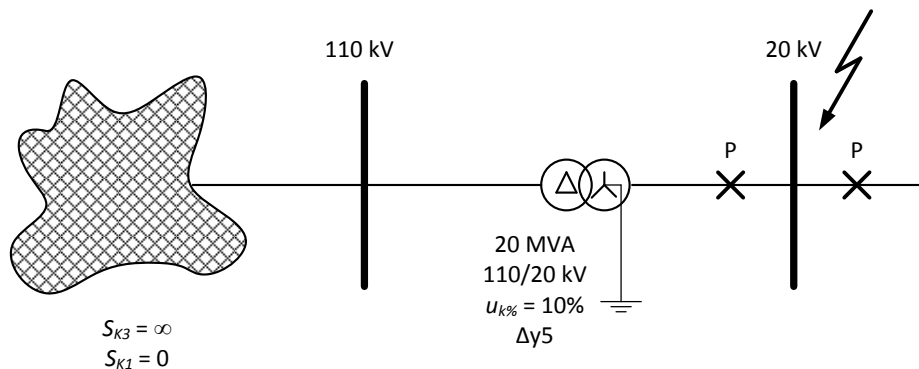
Prema tome je rasklopna moć sklopke nazivnog napona U_n , koja je ugrađena u odvod mreže nazivnog napona $U_n' < U_d < U_n$ jednaka:

$$S_r' = S_r \cdot \frac{U_n'}{U_n}.$$

Kada su napokon određene potrebne veličine sklopke, U_n , I_n , S_n , potrebno je iz literature³⁹ odabrati sklopku za koju će vrijediti:

$$\begin{aligned} U_{ntab} &\geq U_n \\ I_{ntab} &\geq I_n \\ S_{rtab} \cdot \frac{U_n'}{U_n} &\geq S_r \end{aligned}$$

26. Primjer – Izračunajte struju jednofaznog, dvofaznog i trofaznog kratkog spoja na strani 20 kV sa slike. Utjecaj visokonaponske mreže zanemarite. Smije li se na sekundarnoj strani transformatora ugraditi sklopka rasklopne snage 400 MVA?



Rješenje:

Izbor mjesta kvara:

Budući da se radi o jednostranom napajanju odvoda, bez paralelnih vodova, mjerodavan je kvar na sabirnici!

Bazni napon je: U_b .

$$X_{dA.M.}'' = X_{iA.M.} = \frac{c \cdot U_b^2}{S_{K3}} = 0 \, \Omega$$

Aktivna mreža (A.M.):

$$X_{0A.M.} = c \cdot U_b^2 \cdot \left(\frac{3}{S_{K1}} - \frac{2}{S_{K3}} \right) = \infty$$

$$X_{dt} = X_{it} = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_b^2}{S_n} = \frac{10}{100} \cdot \frac{20^2}{20} = 2 \, \Omega$$

$$X_{0t} \cong X_{dt} \text{ (sa sekundara)} = 2 \, \Omega$$

Transformator (T):

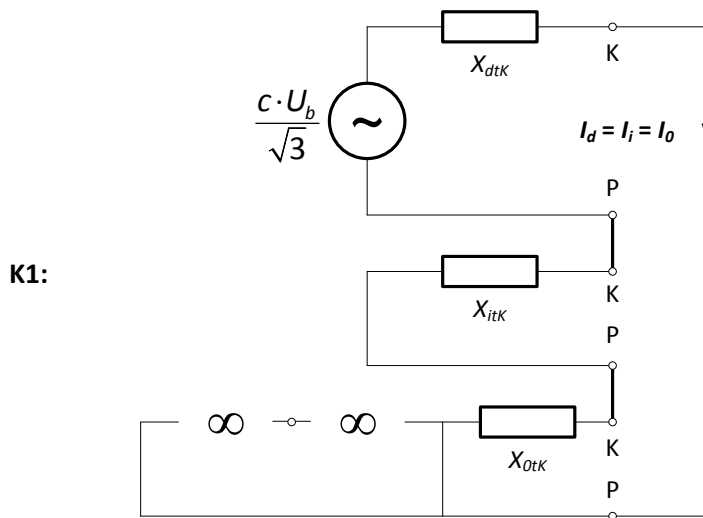
$$X_{0t} = \infty \text{ (sa primara)}$$

$$K_T = 0,95 \cdot \frac{c_{\max}}{1 + 0,6x_T} = 0,95 \cdot \frac{1,1}{1 + 0,6 \cdot 0,1} = 0,986$$

$$X_{dtK} = X_{itK} = K_T \cdot X_{dt} = 1,972 \, \Omega$$

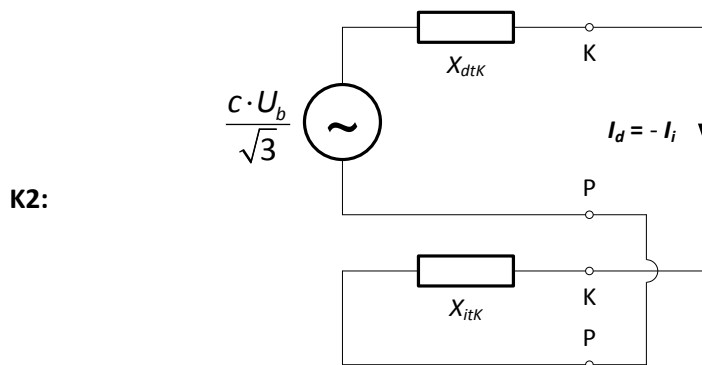
³⁹ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 312 i 313, tablica 4.15 i 4.16

Struje kratkog spoja:



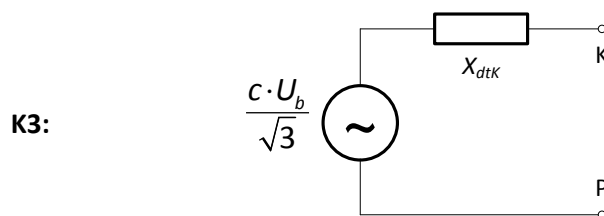
$$I_{K1} = \frac{\sqrt{3} \cdot c \cdot U_b}{X_d + X_i + X_0}$$

$$= \frac{\sqrt{3} \cdot 1,1 \cdot 20}{3 \cdot 1,972} = 6,441 \text{ kA}$$



$$I_{K2} = \frac{c \cdot U_b}{X_d + X_i}$$

$$= \frac{1,1 \cdot 20}{2 \cdot 1,972} = 5,578 \text{ kA}$$



$$I_{K3} = \frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3} \cdot X_d}$$

$$= \frac{1,1 \cdot 20}{\sqrt{3} \cdot 1,972} = 6,441 \text{ kA}$$

Odabir sklopke na 20 kV strani:

Prema literaturi⁴⁰ to je sklopka sa slijedećim podacima:

$$U_n = 20 \text{ kV} (U_d = 14 \text{ kV}, U_g = 23 \text{ kV})$$

$$I_n = 600 \text{ A}$$

$$S_r = 400 \text{ MVA}$$

$$I_{\max.\text{norm.pog.}} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{20}{\sqrt{3} \cdot 20} = 577 \text{ A} < 600 \text{ A}$$

⁴⁰ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 312, tablica 4.15

$$S_r = \sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_K''$$

$$I_K'' = \max(I_{K1}, I_{K2}, I_{K3}) = 6,441 \text{ kA}$$

$$S_r = \sqrt{3} \cdot 20 \cdot 6,441 = 223 \text{ MVA} < 400 \text{ MVA}.$$

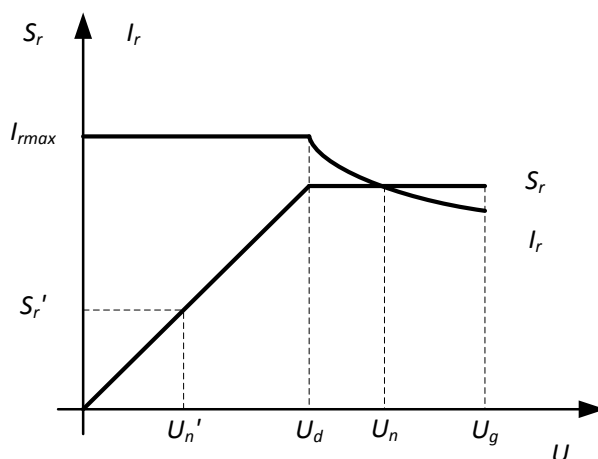
Dakle s obzirom na maksimalnu dopuštenu struju u normalnom pogonu i potrebnu rasklopnu moć, odabrana sklopka zadovoljava uvjete.

27. Primjer – Sklopku nazivnog napona 30 kV, gornjeg napona, $U_g = 35 \text{ kV}$, donjeg napona, $U_d = 24 \text{ kV}$ i rasklopne snage 400 MVA želimo upotrijebiti u 10 kV postrojenju na mjestu gdje je:

- a) maksimalna struja u normalnom pogonu 800 A, a rasklopna snaga 100 MVA;
- b) maksimalna struja u normalnom pogonu 800 A, a rasklopna snaga 200 MVA;

Da li sklopka zadovoljava u oba slučaja?

Rješenje:



Prema literaturi⁴¹ to je sklopka sa slijedećim podacima:

$$U_n = 30 \text{ kV} (U_d = 24 \text{ kV}, U_g = 35 \text{ kV})$$

$$I_n = 1000 \text{ A}$$

$$S_r = 400 \text{ MVA}$$

$$U_n' = 10 \text{ kV} \leq U_n = 30 \text{ kV} \Rightarrow S_r' = S_m \cdot \frac{U_n'}{U_n} = 400 \cdot \frac{10}{30} = 133,3 \text{ MVA}$$

⁴¹ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 312, tablica 4.15

a) maksimalna struja u normalnom pogonu 800 A, a rasklopna snaga 100 MVA

$$U_n = 30 \text{ kV} > 10 \text{ kV}$$

$$I_n = 1000 \text{ A} > 800 \text{ A}$$

$$S_m' = 133,3 \text{ MVA} > 100 \text{ MVA}$$

Zadovoljava!!!

b) maksimalna struja u normalnom pogonu 800 A, a rasklopna snaga 200 MVA

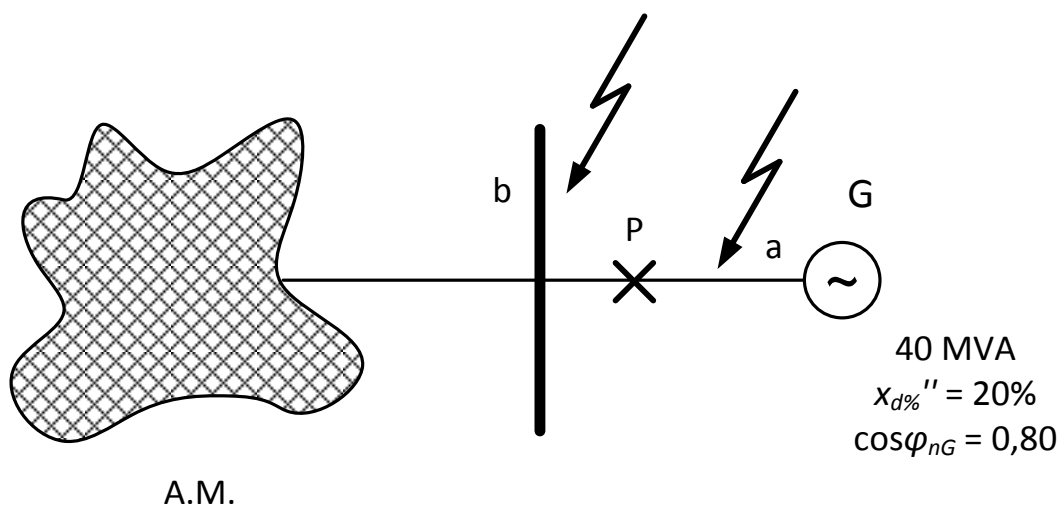
$$U_n = 30 \text{ kV} > 10 \text{ kV}$$

$$I_n = 1000 \text{ A} > 800 \text{ A}$$

$$S_m' = 133,3 \text{ MVA} < 200 \text{ MVA}$$

Ne zadovoljava!!!

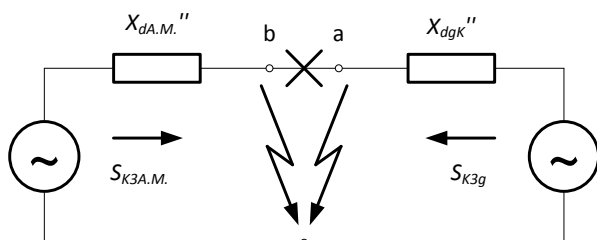
28. Primjer – Generator (slika) je priključen sklopkom na sabirnice sustava na mjestu gdje je snaga trofaznog kratkog spoja prije priključka generatora iznosila 400 MVA. Ako je ugrađena sklopka rasklopne snage $S_r = 300 \text{ MVA}$, da li takvo rješenje zadovoljava?



Rješenje:

Što se tiče izbora mjesta najnepovoljnijeg kvara po promatranu sklopku u odvodu generatora potrebno je promatrati dva slučaja s obzirom da se radi o dvostrano napajanom mjestu kvara:

- a) mjesto kvara u odvodu generatora, "a"
- b) mjesto kvara na sabirnici, "b"



$$X_{dg}'' = \frac{20}{100} \cdot \frac{U_b^2}{40} = 0,005 \cdot U_b^2$$

$$\sin \varphi_{nG} = \sqrt{1 - \cos^2 \varphi_{nG}} = \sqrt{1 - 0,80^2} = 0,6$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} = \frac{1,1}{1 + 0,20 \cdot 0,6} = 0,982$$

$$X_{dgK}'' = K_G \cdot X_{dg}'' = 0,00491 \cdot U_b^2$$

$$S_{K3g} = \frac{U_b^2}{X_{dgK}''} = \frac{1}{0,00491} = 203,67 \cong 200 \text{ MVA}$$

$$S_{K3A.M.} = 400 \text{ MVA}$$

mjesto kvara "a"

mjesto kvara "b"

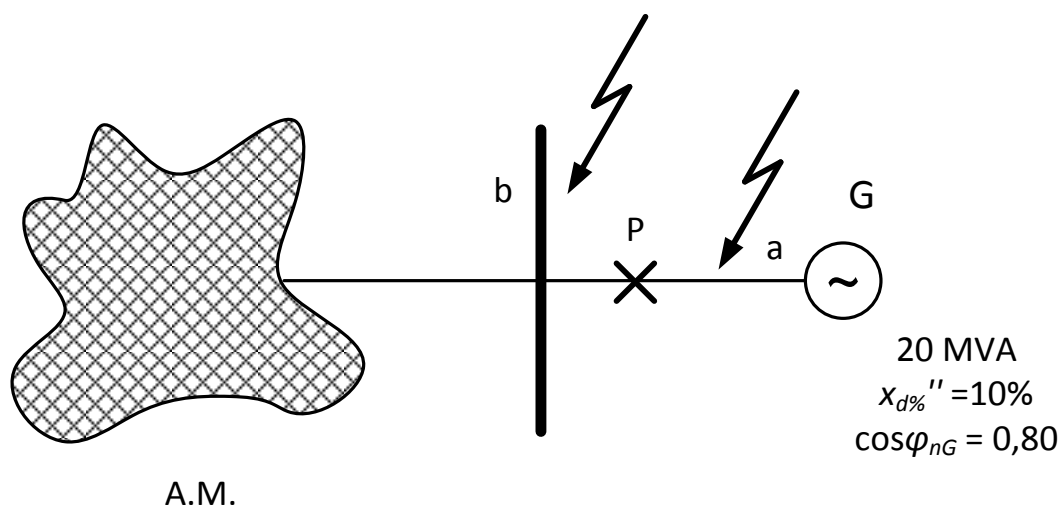
$$S_{ra} = S_{K3A.M.} = 400 \text{ MVA} \quad S_{rb} = S_{K3g} = 200 \text{ MVA}$$

Potrebna rasklopna snaga:

$$S_r' = \max(S_{K3A.M.}, S_{K3g}) = 400 \text{ MVA} > 300 \text{ MVA}$$

dakle, odabrana sklopka ne zadovoljava!

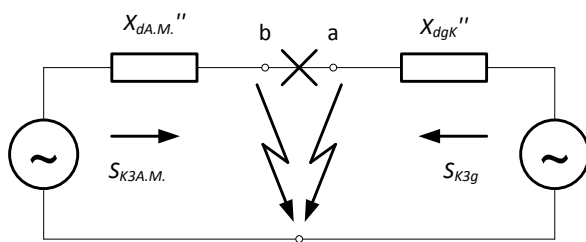
29. Primjer – Generator (slika) je priključen sklopkom na sabirnice sustava. Snaga trofaznog kratkog spoja na sabirnicama sustava uz generator uključen iznosi 500 MVA. Ako je ugrađena sklopka rasklopne snage $S_r = 250 \text{ MVA}$, da li takvo rješenje zadovoljava?



Rješenje:

Što se tiče izbora mjesta najnepovoljnijeg kvara po promatranu sklopku u odvodu generatora potrebno je promatrati dva slučaja s obzirom da se radi o dvostrano napajanom mjestu kvara:

- mjesto kvara u odvodu generatora, "a"
- mjesto kvara na sabirnici, "b"



$$X_{dg}'' = \frac{10}{100} \cdot \frac{U_b^2}{20} = 0,005 \cdot U_b^2$$

$$K_G = \frac{U_n}{U_{nG}} \cdot \frac{c_{\max}}{1 + x_d'' \sin \varphi_{nG}} = \frac{1,1}{1 + 0,10 \cdot 0,6} = 1,038$$

$$X_{dgK}'' = K_G \cdot X_{dg}'' = 0,00519 \cdot U_b^2$$

$$S_{K3g} = \frac{U_b^2}{X_{dgK}''} = \frac{1}{0,00519} = 192,68 \approx 190 \text{ MVA}$$

$$S_{K3A.M.} = S_{K3} - S_{K3g}$$

$$S_{K3A.M.} = 500 - 190 = 310 \text{ MVA}$$

mjesto kvara "a"

mjesto kvara "b"

$$S_{ra} = S_{K3A.M.} = 310 \text{ MVA} \quad S_{rb} = S_{K3g} = 190 \text{ MVA}$$

Potrebna rasklopna snaga:

$$S_r' = \max(S_{K3A.M.}, S_{K3g}) = 310 \text{ MVA} > 250 \text{ MVA}$$

dakle, odabrana sklopka ne zadovoljava!

18. Kabeli

Izbor presjeka kabela vrši se prema:

- a) maksimalnoj dopuštenoj struji u normalnom pogonu
- b) zagrijavanju za vrijeme trajanja KS

Izbor presjeka kabela s obzirom na maksimalnu dopuštenu struju u normalnom pogonu

Najprije je potrebno odrediti odgovarajući presjek kabela prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu. Ona se određuje na jednak način kao i u slučaju dimenzioniranja rastavljača i sklopki, analizom svih mogućih slučajeva normalnog pogona iz čega se potom zaključuje o maksimalnoj mogućoj snazi kroz kabel u normalnom pogonu, S_{max} :

$$I_{max.norm.pog.} = \frac{S_{max}}{\sqrt{3} \cdot U_n}$$

gdje je U_n nazivni napon kabela.

Sada je potrebno iz literature⁴² odabrati odgovarajući trožilni bakreni ili aluminijski kojem će vrijednost dopuštene struje u normalnom pogonu biti veća od izračunate vrijednosti. U spomenutoj su literaturi navedene vrijednosti dopuštenih struja u normalnom pogonu za četiri vrste kabela: IPZO 13, IPO 13, IPZO 13-A i IPO 13-A, ali koje vrijede uz slijedeće uvjete:

- u zemlju na dubini od 70 cm ukopan je jedan trožilni kabel
- temperatura tla iznosi 20°C
- temperatura vodiča u normalnom pogonu ne prelazi 65°C (6 kV kabel), 55°C (10 - 20 kV kabel), 45°C (30 - 60 kV kabel).

Ukoliko za položeni kabel vrijede neki drugi uvjeti, onda je potrebno navedenu vrijednost iz tablice o dopuštenoj struji u normalnom pogonu korigirati tako da je zapravo prava vrijednost dopuštene struje u normalnom pogonu za neki presjek kabela dana izrazom:

$$I_{dop.} = I_{dop.tabela} \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \geq I_{max.norm.pog.}$$

gdje su:

- k_1 = korekcionni faktor kojime se uzima u obzir slučaj kada je u zemlju položeno više ovakvih trožilnih kabela. Vrijednost korekcionnih faktora u ovoj tabeli navedeni su uz pretpostavku da se ovakvi trožilni kabeli polažu na međusobnom razmaku od 7 cm
- k_2 = korekcionni faktor kojime se uzima u obzir položeni zaštitni pokrov iznad kabela = 0,8 – 0,9

⁴² Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 371 i 372, tablice 4.19 i 4.20

- k_3 = korekcionni faktor kojime se uzima u obzir slučaj kada se kabel ne polaže u zemlju, već je na zraku i koriste se podaci uz pretpostavku da su kabeli položeni u zraku čija je temperatura 20°C
- k_4 = korekcionni faktor kojime se uzima u obzir da temperatura tla ili zraka, gdje je položen kabel, ne mora biti 20°C, a koriste se vrijednosti navedene u literaturi⁴³.

Označavanje kabela – primjeri

IPZO 13 3 X 120 mm² = trofazni trožilni kabel s vodičima od bakra;

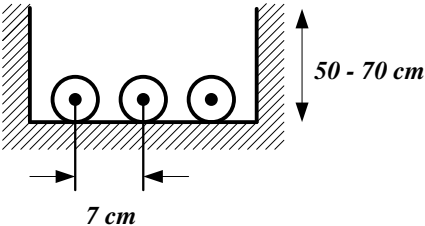
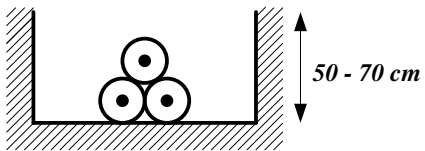

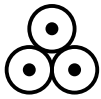
IPZO 13 - A 3 X 120 mm² = trofazni trožilni kabel s vodičima od aluminija;

XHE 49 3 X (1 X 150 mm²) = tri jednožilna kabela s vodičima od bakra;

XHE 49 - A 3 X (1 X 150 mm²) = tri jednožilna kabela s vodičima od aluminija;

Kabel XHE 49 - A 3 X (1 X 150 mm²) – proizvodi: ELKA kabele d.o.o.

XHE 49 - A 3 X (1 X 150 mm²) jest energetska kabel koji se izvodi s 20/30 kV pogonskim naponom, kao jednožilni kabel i vrijedi da mu je dopuštena struja u normalnom pogonu za slijedeće slučajeve jednaka:

kabel položen u zemlju (1)		$I_{dop.}(20 \text{ kV}) = 360 \text{ A}$ $I_{dop.}(30 \text{ kV}) = 355 \text{ A}$
kabel položen u zemlju (2)		$I_{dop.}(20 \text{ kV}) = 345 \text{ A}$ $I_{dop.}(30 \text{ kV}) = 335 \text{ A}$
kabel položen u zraku (1)		$I_{dop.}(20 \text{ kV}) = 400 \text{ A}$ $I_{dop.}(30 \text{ kV}) = 420 \text{ A}$
kabel položen u zraku (2)		$I_{dop.}(20 \text{ kV}) = 375 \text{ A}$ $I_{dop.}(30 \text{ kV}) = 380 \text{ A}$

Gore navedene vrijednosti dopuštenih struja Elkinog kabela XHE 49 - A 3 X (1 X 150 mm²) vrijede uz pretpostavku da je temperatura tla 20°C odnosno zraka 30°C te da se radi o samo jednom kabelskom sistemu (tri jednožilna kabela) u rovu.

(Za više informacija o kabelima možete posjetiti internetsku stranicu:

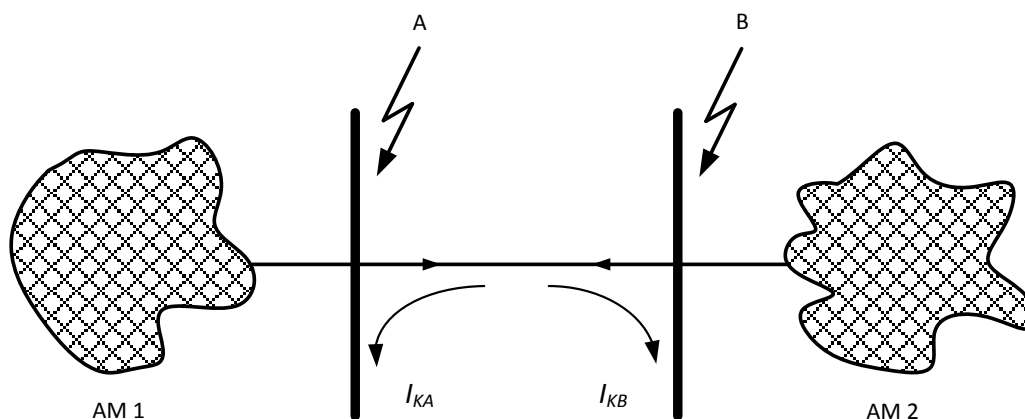
http://www.elka.hr/index.php?option=com_katalog&task=listc&id=2&Itemid=39)

⁴³ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 373

Izbor presjeka kabela s obzirom na zagrijavanje za vrijeme trajanja KS

Nakon što je odabran presjek kabela prema maksimalnoj struji u normalnom pogonu, potrebno je još provesti kontrolu tako odabranog kabela s obzirom na zagrijavanje za vrijeme trajanja kratkog spoja.

Prvo je potrebno izvršiti izbor mjerodavnog mjesta kvara. Potrebno je provjeriti u kojem slučaju teče veća komponenta struje kvara; za slučajeve najnepovoljnijeg kvara na oba njegova kraja. Veću od tih struja potrebno je smatrati mjerodavnom za dimenzioniranje kabela s obzirom na zagrijavanje za vrijeme trajanja KS.



Slika 24

Vrsta najnepovoljnijeg kvara za kvar na sabirnicama oba kraja kabela određuje se na uobičajen način.

Odabrani kabel zadovoljava s obzirom na zagrijavanje za vrijeme trajanja KS ukoliko je ispunjen uvjet slijedeće nejednakosti, odnosno ukoliko je presjek kabela veći od:

$$q \geq \alpha \cdot I_t \cdot \sqrt{t}$$

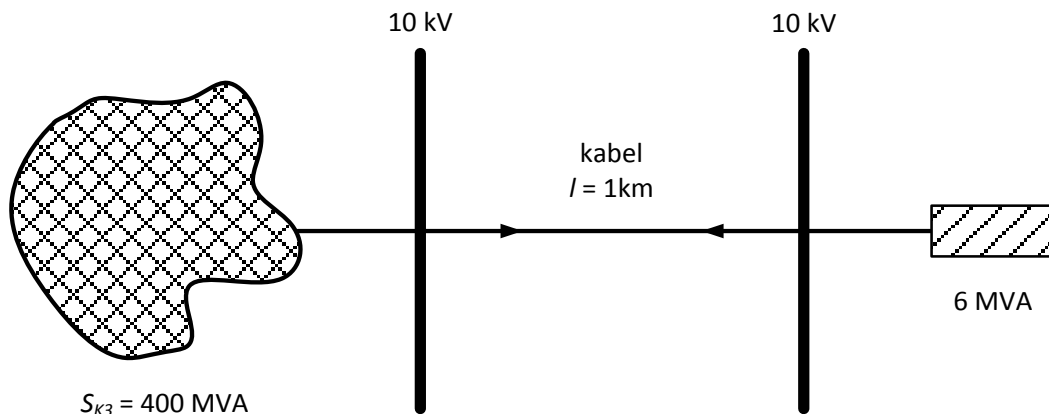
gdje su:

- α - veličina ovisna o materijalu i nazivnom naponu kabela i očitava se iz literature⁴⁴ kao i vrijednosti za $\Delta \vartheta$ (dopušteno povišenje temperature kabela za vrijeme trajanja KS)
- I_t - već nekoliko puta spomenuta struja mjerodavna za ugrijavanje koja se računa pomoću najnepovoljnije struje kvara po promatrani kabel u razvodnoj mreži (vrstu i mjesto kvara za tu je struju potrebno odrediti na prethodno opisane načine kao i kod rastavljača i sklopki)
- t - vrijeme trajanja KS-a (prema postavljenoj relejnoj zaštiti)

Potreban presjek kabela uvijek je određen najstrožim kriterijem, dakle to je najveći od svih presjeka koji su dobiveni kontrolom na postavljene uvjete (maksimalna struja u normalnom pogonu i zagrijavanje za vrijeme trajanja KS).

⁴⁴ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 373

30. Primjer – Iz transformatorske stanice 35/10 kV napaja se kabelom jedna tvornička hala ukupne snage 6 MVA. Ako je na sabirnicama 10 kV snaga trofaznog KS, $S_{K3} = 400$ MVA, odaberite napojni kabel (slika). Poznati su slijedeći podaci: $R/X = 1$; $I_K''/I_K = 1$; $t_k = 1$ s. Kabel se polaže u zemlju i pokriva ciglom. Udaljenost hale do transformatorske stanice je 1 km. Kabel se polaže u zajednički rov s još jednim kabelom. Koeficijent α iznosi 8, a temperatura okoline iznosi prosječno 20°C.



Rješenje:

$$I_{\max.\text{norm.pog.}} = \frac{S_{\max}}{\sqrt{3} \cdot U_n} = \frac{6}{\sqrt{3} \cdot 10} = 346,41 \text{ A}$$

Početno se može odabrati kabel koji na prvi pogled zadovoljava prema maksimalnoj strujnoj opteretivosti u normalnom pogonu. Neka je to **bakreni kabel IPO 13 za 10 kV, presjeka 185 mm²** čija je strujna opteretivost jednaka:

$$I_{\text{dop.}} = 360 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot k_4 \text{ [A]}$$

$k_1 = 0,9$ (dva kabela u rovu);

$k_2 = 0,9$ (zaštitni pokrov);

$k_3 = 1$ (kabel je položen u zemlju);

$k_4 = 1$ (temperatura tla je 20°C)

Slijedi da je:

$$I_{\text{dop.}} = 360 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1 = 291,6 \text{ A} < 346,41 \text{ A}$$

Potrebno je dakle uzeti kabel većeg presjeka, a to je **bakreni kabel IPO 13 za 10 kV, presjeka 240 mm²**, čija je strujna opteretivost jednaka:

$$I_{\text{dop.}} = 420 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1 = 340,2 \text{ A} < 346,41 \text{ A}$$

Budući da ni ovaj kabel ne zadovoljava, potrebno je uzeti kabel još većeg presjeka, a to je **bakreni kabel IPO 13 za 10 kV, presjeka 300 mm²** čija je strujna opteretivost jednaka:

$$I_{dop.} = 475 \cdot 0,9 \cdot 0,9 \cdot 1 \cdot 1 = 384,75 \text{ A} > 346,41 \text{ A}.$$

Odabrani **kabel IPO 13 3 X 300 mm²** zadovoljava s obzirom na maksimalnu struju u normalnom pogonu. Sada slijedi kontrola odabranog kabela s obzirom na zagrijavanje za vrijeme trajanja KS.

$$q \geq \alpha \cdot I_t \cdot \sqrt{t} = \alpha \cdot I_k'' \cdot \sqrt{m+n} \cdot \sqrt{t}$$

Budući da je sam kabel relativno kratak (1 km), zanemarujemo njegovu reaktanciju u odnosu na reaktanciju ostatka mreže zbog čega je:

$$I_{k3}'' = \frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3} \cdot X_{duk}''} = \frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3} \cdot X_{A.M.}''} = \frac{c \cdot U_b}{\sqrt{3} \cdot \frac{c \cdot U_b^2}{S_{K3}}} = \frac{S_{K3}}{\sqrt{3} \cdot U_b} = \frac{400}{\sqrt{3} \cdot 10} = 23,1 \text{ kA}$$

$$m = f\left(\frac{R}{X} = 1; t_k = 1 \text{ s}\right) = 0$$

$$n = f\left(\sigma_m = \frac{I_k''}{I_k} = 1; t_k = 1 \text{ s}\right) = 1$$

$$q \geq 8 \cdot 23,1 \cdot \sqrt{1} = 184,8 \text{ mm}^2 < 300 \text{ mm}^2$$

Dakle kabel **Cu IPO 13 3 X 300 mm², U_n = 10 kV** zadovoljava i s obzirom na zagrijavanje u vrijeme trajanja KS pa ga je moguće koristiti u promatranoj mreži kao napojni kabel.

19. Relejna zaštita u električnim postrojenjima

Nadstrujni i usmjereni releji

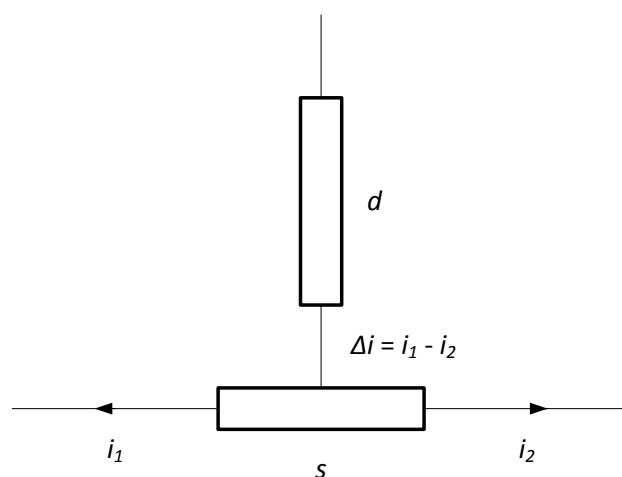
(Literatura⁴⁵)

Važno jer se prema vremenskom zatezanju nadstrujnih releja određuje koliko će trajati kvar u pojedinim dijelovima razvodne mreže.

Diferencijalna zaštita

Diferencijalni releji su u principu nadstrujni releji bez vremenskog zatezanja, koji spojeni preko strujnih transformatora uspoređuju struje na početku i na kraju štice elementa (generatora, transformatora, vod i sl.). Ako se pojavi razlika u veličini (bilo po iznosu, bilo po fazi) tih struja, kroz relej poteče struja pa on djeluje.

U normalnom pogonu, kada nema kvara na štice elementu, odnosno unutar stezaljki strujnih transformatora na koje je priključen diferencijalni relej, kroz relej ne teče nikakva struja pa on ne djeluje. Naravno, to bi doista bilo tako kada bi nadstrujne karakteristike te prijenosni omjeri oba transformatora bili jednaki. Stoga se, kako ne bi došlo do prorade releja za kvarove van štice elementa područja kao i u normalnom pogonu, vrši tzv. **stabilizacija** diferencijalne zaštite.



Slika 25

U tom slučaju dolazi do prorade zaštite samo ako je:

$$\Delta i = |i_1 - i_2| < |i_1 + i_2|$$

što je uvijek zadovoljeno u slučaju kvara unutar štice elementa područja. Gornji uvjet nije ispunjen za slučaj kvara van štice elementa područja, kao i u slučaju normalnog pogona.

⁴⁵ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 464 - 491

Diferencijalna zaštita dvonamotnih transformatora, (literatura⁴⁶ str. 530 - 538)

Prilikom izvedbe diferencijalne zaštite dvonamotnih transformatora, potrebno je voditi računa da se strujni transformatori odaberu s takvim spojem i prijenosnim omjerom da se u normalnom pogonu te za kvarove van šticeenog područja struje na sekundarnim stranama strujnih transformatora podudaraju i po fazi i po iznosu.

S druge strane važno je da se pri tome:

- mogu upotrijebiti strujni transformatori normalizirane primarne struje (naime, nazivne sekundarne struje strujnih transformatora su uobičajeno 1 ili 5 A), odnosno prijenosnog omjera;
- mogu uzemljiti sekundarne stezaljke strujnih transformatora (zaštitna mjera koja nije izvedena, ako je sekundar strujnog transformatora spojen u trokut)

Tako se onda redovito diferencijalna zaštita dvonamotnih transformatora izvodi s jednim međutransformatorom koji ima isti spoj kao i dvonamotni učinski transformator, a spojen je na sekundarne namote strujnih transformatora spojenih sada u zvijezdu. Postavljanjem međutransformatora koji se sada brine da fazni zakret (grupom spoja) te iznos (prijenosnim omjerom) sekundarnih struja strujnih transformatora bude jednak u slučajevima normalnog pogona i kvara van šticeenog područja, moguće je sada upotrijebiti strujne transformatore normaliziranog prijenosnog omjera.

⁴⁶ Udžbenik „Visokonaponska rasklopna postrojenja“, H. Požar, str 530 - 538



20. Strujni mjerni transformatori

Uređaji za mjerenje i zaštitu u visokonaponskim postrojenjima se ne priključuju neposredno na elemente/vodove visokog napona, jer bi se u tom slučaju moralo koristiti vrlo skupe mjerne instrumente i releje, s obzirom da će oni biti izvrnuti visokim naponima i strujama. Stoga se redovito za priključak mjernih i zaštitnih uređaja ne elemente visokonaponskih rasklopnih postrojenja koriste mjerni (strujni i naponski) transformatori kojima je zadatak da pogonske struje i napone transformiraju na veličine koje omogućavaju upotrebu mjernih uređaja i releja izrađenih za nazivne struje od 5 A ili 1 A te za napon 100 V.

Strujni mjerni transformator principijelno je izveden kao i svaki drugi transformator sa željeznom, znači ima primarni i sekundarni namot te željeznu jezgru sastavljenu od limova, samo što se njegov primarni i sekundarni namot spaja (za razliku od slučaja s naponskim transformatorom) u seriju s ostalim elementima postrojenja.

Nazivne primarne struje SMT-a mogu biti $m \cdot 10$; $m \cdot 15$; $m \cdot 20$; $m \cdot 30$; $m \cdot 50$; $m \cdot 75$ (A); gdje m može biti 1, 10 ili 100.

Kao posljedica postojanja određene potrebne struje magnetiziranja za rad transformatora te nekih realnih reaktancija namota transformatora, strujne transformatore karakteriziraju određena strujna i kutna pogreška.

Strujna pogreška

Strujna pogreška (%) određena je relacijom:

$$\Delta i_{\%} = \frac{K \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 \%$$

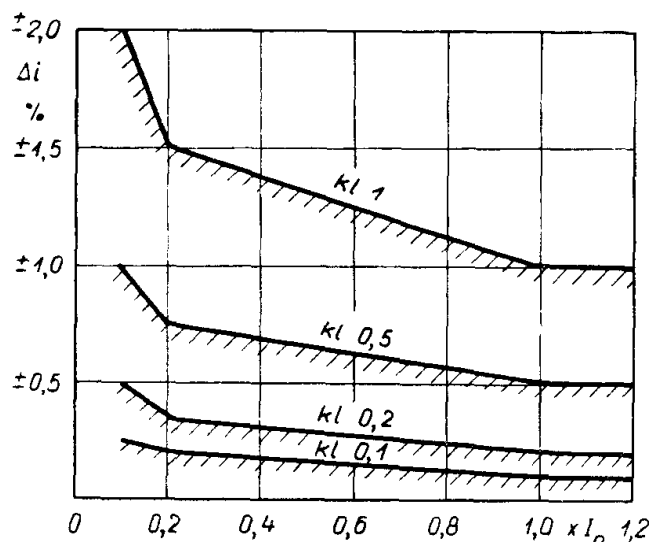
gdje je K omjer primarne i sekundarne nazivne struje strujnog transformatora odnosno prijenosni omjer ST-a.

Kutna pogreška - δ

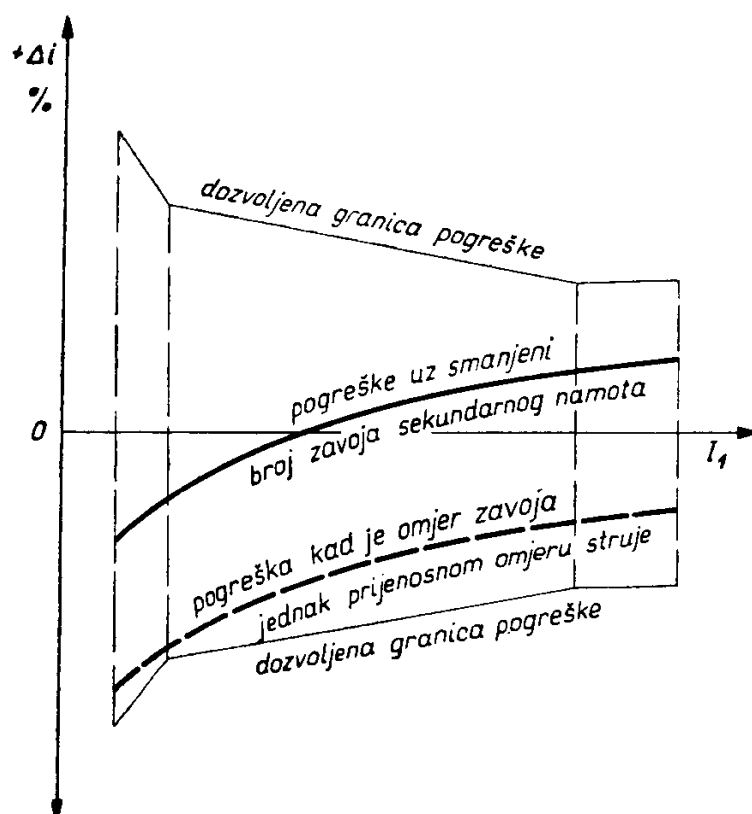
Kutna pogreška, δ , definirana je kutom između primarne i sekundarne struje transformatora. Ona je pozitivna ako sekundarna struja prethodi primarnoj struji.

Klasa točnosti

Klasa točnosti strujnog transformatora jednaka je dopuštenoj strujnoj pogrešci u postocima pri nazivnoj struji. Tako na primjer strujni transformator **klase točnosti 1 ima dopuštenu strujnu pogrešku $\pm 1\%$ pri nazivnoj struji**. Prema njemačkim propisima razlikujemo slijedeće klase točnosti strujnih transformatora: 0,1 – 0,2 – 0,5 – 1 – 3 – (5). Za pojedine klase točnosti propisane su i dopuštene strujne pogreške kod drugih struja opterećenja strujnog transformatora. Na slici su krivuljom prikazane maksimalne strujne pogreške strujnog transformatora klase točnosti npr. 1, za razne veličine primarne struje (za primarne struje manje od nazivne dopuštene su relativno veće strujne pogreške od one definirane klasom točnosti).



Slika 26



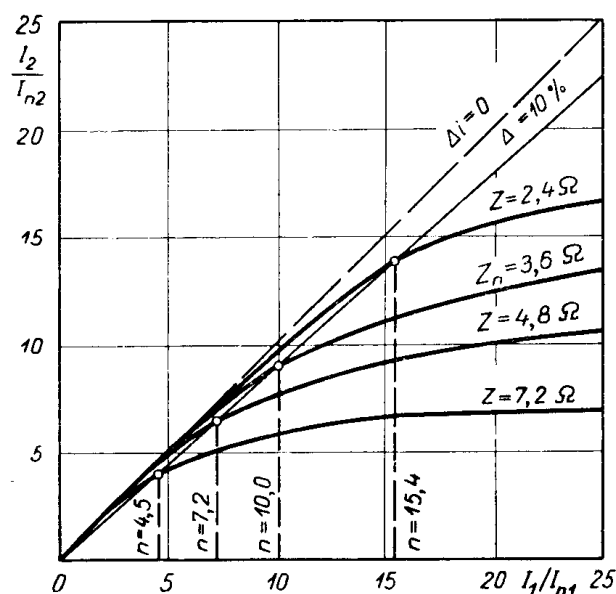
Slika 27

Važno je napomenuti da se prijenosni omjer transformatora (omjer nazivnih struja) i omjer zavoja ne podudaraju, jer bi u tom slučaju strujna pogreška transformatora bila stalno negativna (za sve primarne struje). **Smanjenjem broja zavoja sekundarnog namota**, krivulja koja za neki strujni transformator prikazuje ovisnost strujne pogreške o opterećenju, pomiče se prema području pozitivne pogreške, (to nam je interesantno, jer su time realno manje strujne pogreške u radu transformatora pri istim strujama).

Strujni višekratnik (n)

Strujni višekratnik (n) je višekratnik primarne nazivne struje ili relativna primarna struja I_1/I_{n1} , pri kojoj je strujna pogreška strujnog transformatora jednaka 10% uz sekundarno priključenu nazivnu impedanciju. Ovaj parametar opisuje vladanje strujnog transformatora u području struja iznad nazivne struje.

Prilikom određivanja strujnog višekratnika koristimo se **nadstrujnom karakteristikom** strujnog transformatora koja prikazuje ovisnost sekundarne struje o primarnoj struji u koordinatnom sustavu, gdje je na ordinati relativna sekundarna struja I_2/I_{n2} , a na apscisi relativna primarna struja I_1/I_{n1} , za neku vrijednost impedancije priključene na sekundarnu stranu strujnog transformatora.



Slika 28

Ako u isti sustav ucrtamo pravac $\Delta i = -10\%$ (jer uz -10% Δi je veći, a nas zanima nepovoljniji slučaj), iz točke presjecišta tog pravca sa nadstrujnom karakteristikom moguće je očitati nadstrujni višekratnik. To je zapravo apscisa točke presjecišta.

$$\Delta i = \frac{\frac{I_{1n}}{I_{2n}} \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100\% = \left(\frac{I_2 / I_{2n}}{I_1 / I_{1n}} - 1 \right) \cdot 100\% = (-10\%)$$

$$\frac{I_2 / I_{2n}}{I_1 / I_{1n}} = 0,9$$

Potrebno je naglasiti da je nadstruja karakteristika ovisna o priključenoj impedanciji. S gornje slike se može zaključiti da je za manji iznos priključene impedancije strujni višekratnik veći (to sada više nije strujni višekratnik strujnog transformatora, jer se on uvijek zadaje za nazivnu impedanciju na sekundaru). Može se približno računati da je:

$$n_x \cong n \cdot \frac{Z_n}{Z_x}$$

Promatramo li dva strujna transformatora koja oba imaju na sekundar spojene nazivne impedancije, evidentno je da onaj koji ima manji višekratnik ima i manje sekundarne struje za iste primarne struje. Zbog toga se onda za vrlo osjetljive mjerne uređaje, koje bi velike struje (puno veće od 120% nazivne, I_{2n}) mogle oštetiti, obavezno koriste strujni transformatori kojima je strujni višekratnik, n , manji od 5.

Naravno, sve do sada navedeno ima smisla samo ako je na sekundar takvog strujnog transformatora, s malim strujnim višekratnikom, priključena nazivna, a ne neka manja impedancija. Zbog toga se u slučajevima kada instrumenti priključeni na sekundar ST-a nemaju dovoljnu impedanciju, njima u seriju priključuje dodatna impedancija.

S druge strane se za priključak releja, za koje je od velike važnosti upravo vjerna transformacija, struja u području velikih iznosa, koje se javljaju prilikom kvarova, koriste strujni transformatori sa $n \geq 5$ (oko 10).

31. Primjer – Kolika je klasa točnosti strujnog transformatora prijenosnog omjera 500/5, ako je sekundarna struja kod priključenog nazivnog tereta 4,85 A, dok je primarna struja 500 A?

Rješenje:

$$\Delta i_{\%} = \frac{K \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 \% = \frac{\frac{I_{1n}}{I_{2n}} \cdot I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100 \%$$

$$= \frac{\frac{500}{5} \cdot 4,85 - 500}{500} \cdot 100 \% = -3 \%$$

Budući da je strujna pogreška pri nazivnoj struji primara od 500 A jednaka 3%, slijedi da je klasa točnosti ovog strujnog transformatora **klasa 3**.

32. Primjer – Na raspolaganju imate strujni mjerni transformator 200/5A, $n = 10$, za nazivnu impedanciju $= 2,5 \Omega (Z_n)$. Strujni transformator želimo upotrijebiti za mjerne uređaje ukupne impedancije 3Ω . Da li promatrani transformator odgovara? Ukoliko ne, što trebamo učiniti želimo li to ipak obaviti?

Rješenje:

Ako na ovakav strujni transformator priključimo impedanciju od 3Ω , on će se ponašati kao da mu je strujni višekratnik, n_1 jednak:

$$n_1 \cong n \cdot \frac{Z_n}{Z_1} = 10 \cdot \frac{2,5}{3} = 8,3$$

S obzirom da je zahtjev da strujni transformator na kojeg se priključuju mjerni uređaji mora imati strujni višekratnik, $n < 5$, potrebno je na sekundar transformatora priključiti veću impedanciju (dodatnu).

$$Z_2 \cong Z_n \cdot \frac{n}{5} = 2,5 \cdot \frac{10}{5} = 5 \Omega$$

Potrebno je dakle u seriju s mjernim uređajima dodatno ugraditi impedanciju iznosa 2Ω , inače promatrani strujni transformator neće odgovarati uvjetima.

21. Paralelni rad energetskih transformatora

Dva ili više transformatora rade paralelno kada su im primari i sekundari spojeni na zajedničke sabirnice. Da bi bio moguć takav paralelni rad transformatora i kako bi se omogućilo puno iskorištenje njihove nazivne snage, transformatori moraju ispunjavati sljedeće uvjete:

- a) moraju imati približno jednake prijenosne omjere
- b) moraju imati približno jednake nazivne napone
- c) moraju imati jednake grupe spoja prema mreži
- d) moraju imati približno jednake napone kratkog spoja, $u_{\%}$, odnosno, naponi kratkog spoja se ne smiju razlikovati više od 10% od aritmetičke sredine napona kratkog spoja svih transformatora
- e) ne smiju imati omjere nazivnih snaga veće od 3:1 (prema nekim propisima 2:1).

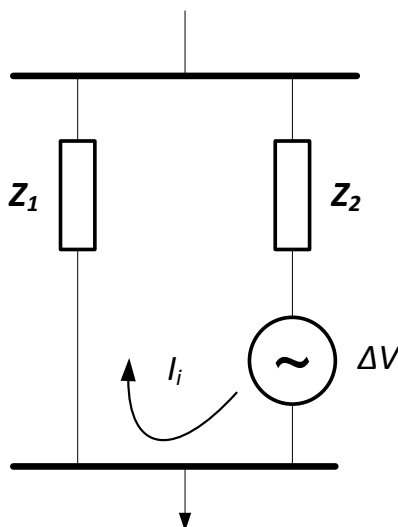
Približno jednaki prijenosni omjeri

Ako prijenosni omjeri transformatora koji rade paralelno nisu jednaki (npr. 30/10 kV i 30/10,5 kV), transformator s većim sekundarnim naponom potjerat će, i prije nego što je priključeno opterećenje na sekundarnu stranu transformatora, struju izjednačenja kroz oba transformatora:

$$I_i = \frac{\Delta V}{Z_{K1} + Z_{K2} + \dots + Z_{Km}} = \frac{\Delta V}{\frac{u_{k1\%}}{100} \cdot \frac{U_{n1}^2}{S_{n1}} + \frac{u_{k2\%}}{100} \cdot \frac{U_{n2}^2}{S_{n2}} + \dots + \frac{u_{km\%}}{100} \cdot \frac{U_{nm}^2}{S_{nm}}}$$

gdje je ΔV = razlika faznih napona na nekoj strani transformatora

Važno je napomenuti da se impedancije u gornjoj formuli preračunavaju na sekundarnu stranu transformatora, jer tako i računamo struje izjednačenja!



Slika 29

To znači da bi se već u praznom hodu mogla pojaviti struja kroz namote transformatora koja odgovara, može se čak reći, polovici nazivne struje. Zbog toga je onda mogućnost opterećivanja paralelno spojenih transformatora znatno manja od zbroja njihovih nazivnih snaga. Pri tome je ta mogućnost to manja što je veća razlika prijenosnih omjera transformatora (veći ΔV), a što su manji naponi kratkog spoja transformatora.

Dakle, transformatori koji nemaju jednake prijenosne omjere 'mogu' raditi paralelno, no to nije ekonomično zbog nemogućnosti potpunog iskorištenja njihovih nazivnih snaga. Tolerira se razlika u prijenosnom omjeru od $\pm 0,5\%$.

Približno jednaki nazivni naponi

Ukoliko spojimo paralelno transformatore jednakih prijenosnih omjera, ali različitih nazivnih napona (npr. 30/10 kV i 31,5/10,5 kV) na napon jednak najnižem nazivnom naponu, neće biti nikakvih neugodnih posljedica, no kada je taj napon viši od najnižeg nazivnog napona teći će kroz neke od transformatora nešto povećana struja magnetiziranja koja će nepovoljno zagrijavati te transformatore i povećavati gubitke u njima. Kako su ipak transformatori građeni tako da mogu izdržati i pogon s naponom 5% višim od nazivnog, tolerira se razlika u nazivnim naponima paralelno spojenih transformatora u toj istoj mjeri.

Jednake grupe spoja

Već i uz najmanji fazni pomak od 30° između faznih napona, kao posljedice različite grupe spoja transformatora, pojavila bi se velika struja izjednačenja kroz namote transformatora već u praznom hodu (npr. uz 30° i razliku napona na sekundaru od 50% U_n te $u_{k\%} = 10\%$ nastala bi struja izjednačenja $I_i = 2,5 I_n$). Ta struja već tada, ovisno o naponu kratkog spoja, prekoračuje nazivnu struju transformatora zbog čega je onda zahtjev na jednakost grupa spoja paralelno spojenih transformatora obavezan.

Prednost ovog zahtjeva ogleda se u mogućnosti da se permutacijom stezaljki mogu transformatori neke grupe spoja prema mreži ponašati kao da su neke druge grupe spoja.

Približno jednaki naponi kratkog spoja

Ako stavimo u paralelni rad više transformatora jednakih napona kratkog spoja, ali različitih snaga, onda će se neki priključeni teret na njih uvijek raspodijeliti u omjeru njihovih nazivnih struja i što je najvažnije, biti će moguće na grupu ovako spojenih transformatora priključiti teret jednak sumi nazivnih snaga svih transformatora.

No ukoliko naponi kratkog spoja transformatora nisu međusobno jednaki, onda maksimalno dozvoljeno opterećenje grupe paralelno spojenih transformatora neće odgovarati zbroju njihovih nazivnih snaga, nego će biti manje od njega. Pri tome će uz to maksimalno dozvoljeno opterećenje grupe transformatora biti nazivno opterećen transformator s najmanjim naponom kratkog spoja.

Maksimalno dopušteno opterećenje grupe paralelno spojenih transformatora sa različitim naponom kratkog spoja se računa na slijedeći način:

$$S_{\text{dopušteno}} = u_{k\%min} \cdot \sum_{i=1}^m \frac{S_{ni}}{u_{k\%i}}$$

Neka je spomenuta grupa transformatora opterećena teretom snage S koja je manja ili jednaka maksimalnoj dopuštenoj. Tada se opterećenje svakog pojedinog transformatora (S_i) računa prema formuli:

$$S_i = S_{ni} \cdot \frac{\frac{S}{u_{k\%i}}}{\sum_{j=1}^m \frac{S_{nj}}{u_{k\%j}}},$$

gdje je $S \leq S_{\text{dopušteno}}$.

Kako rad uz maksimalnu dopuštenu snagu koja je manja od zbroja nazivnih snaga svih transformatora nije ekonomičan, to se onda dopuštaju male razlike u naponima kratkog spoja transformatora (pogotovo stoga što se u kraćim razdobljima dopušta i preopterećenje transformatora).

Omjeri nazivnih snaga ne veći od 3:1 (2:1)

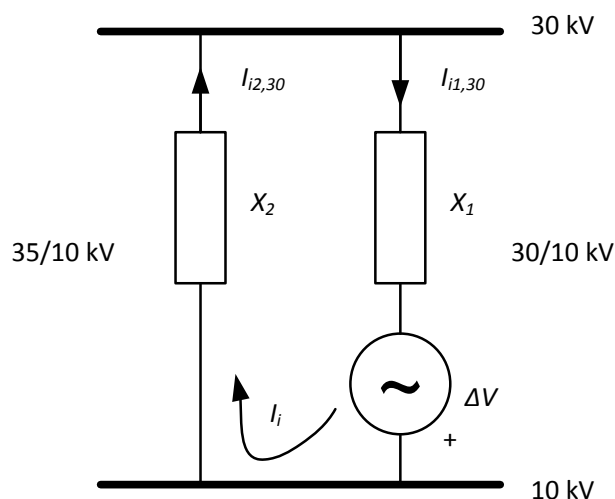
Za transformatore jednakih napona kratkog spoja, ali različitih snaga, karakteristično je da im se razlikuje omjer R/X što dovodi do faznog zakreta njihovih po iznosu jednakih faznih napona, odnosno time i do pojave struje izjednačenja bez obzira na jednakost njihovih napona kratkog spoja. Ta je pojava to izraženija što je veća razlika u nazivnim snagama transformatora. Zbog toga se onda ne izvodi paralelno spajanje transformatora čiji je omjer nazivnih snaga veći od 3:1 (2:1).

33. Primjer – Nađite razliku faznih napona i struju izjednačenja na niženaponskoj strani paralelnog spoja transformatora u neopterećenom stanju. Transformatori su priključeni na 30 kV, a njihove su karakteristike:

T1: $S_n = 50 \text{ MVA}$; 30/10 kV; $u_{k\%} = 8\%$; Yd5,

T2: $S_n = 50 \text{ MVA}$; 35/10 kV; $u_{k\%} = 7\%$; Yd5.

Rješenje:



$$X_1 = \frac{u_{k1\%}}{100} \cdot \frac{U_{n2}^2}{S_{n1}} = \frac{8}{100} \cdot \frac{10^2}{50} = j0,16 \, \Omega$$

$$X_2 = \frac{u_{k2\%}}{100} \cdot \frac{U_{n2}^2}{S_{n2}} = \frac{7}{100} \cdot \frac{10^2}{50} = j0,14 \, \Omega$$

Sekundar (10 kV):

$$\Delta V = \frac{30}{\sqrt{3}} \cdot \frac{10}{30} - \frac{30}{\sqrt{3}} \cdot \frac{10}{35} = 0,825 \text{ kV}$$

$$I_i = \frac{\Delta V}{X_1 + X_2} = \frac{825}{0,16 + 0,14} = 2750 \text{ A}$$

$$I_{i1,30} = I_i \cdot \left(\frac{U_{2n}}{U_{1n}} \right)_1 = 2750 \cdot \frac{10}{30} = 916,67 \text{ A}$$

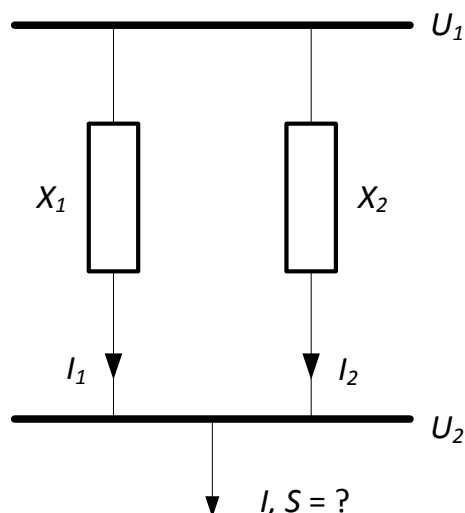
Preračunavanje na primar (30 kV):

$$I_{i2,30} = I_i \cdot \left(\frac{U_{2n}}{U_{1n}} \right)_2 = 2750 \cdot \frac{10}{35} = 785,7 \text{ A}$$

$$\Delta I_{30} = I_{i1,30} - I_{i2,30} = 916,67 - 785,7 = 130,97 \text{ A}$$

34. Primjer – U pogonu se nalaze dva transformatora jednakih nazivnih snaga te s naponima kratkog spoja 5% i 10%. Koliko iznosi maksimalna snaga opterećenja ovih transformatora, ako nije dopušteno preopterećenje niti jednog od transformatora?

Rješenje:



$$\Delta V = 0 \Rightarrow I_1 \cdot X_1 = I_2 \cdot X_2$$

$$\frac{S_1}{\sqrt{3} \cdot U_2} \cdot \frac{u_{k\%1}}{100} \cdot \frac{U_{2n}^2}{S_{n1}} = \frac{S_2}{\sqrt{3} \cdot U_2} \cdot \frac{u_{k\%2}}{100} \cdot \frac{U_{2n}^2}{S_{n2}}$$

$$\frac{S_1}{S_{n1}} \cdot u_{k\%1} = \frac{S_2}{S_{n2}} \cdot u_{k\%2}$$

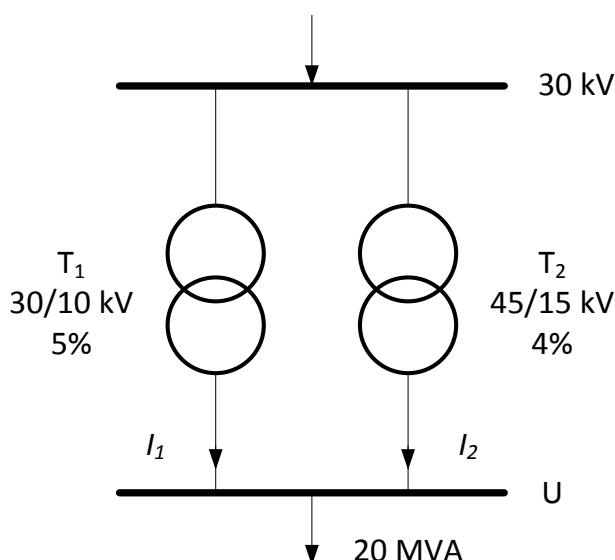
$$u_{k\%1} < u_{k\%2} \Rightarrow S_1 = S_{n1}$$

$$S_2 = S_{n2} \cdot \frac{u_{k\%1}}{u_{k\%2}} = S_{n2} \cdot \frac{5}{10}$$

$$S_d = S_1 + S_2 = S_{n1} + \frac{1}{2} S_{n2} = \frac{3}{2} S_n$$

35. Primjer – Raspolažemo s dva transformatora iste grupe spoja i nazivne snage po 10 MVA. Prvi ima prijenosni omjer 30/10 kV i napon kratkog spoja 5% a drugi 45/15 kV i 4%. Kvantitativno pokazati što će se desiti, ako ih stavimo da rade paralelno na primarni napon 30 kV i opteretimo s 20 MVA.

Rješenje:



$$\Delta V = \frac{30}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{10}{30} - \frac{15}{45} \right) = 0 \text{ kV} \Rightarrow I_1 \cdot X_1 = I_2 \cdot X_2$$

$$\frac{S_1}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \frac{u_{k\%1}}{100} \cdot \frac{U_{2n}^2}{S_{n1}} = \frac{S_2}{\sqrt{3} \cdot U} \cdot \frac{u_{k\%2}}{100} \cdot \frac{U_{2n}^2}{S_{n2}}$$

$$\frac{S_1}{S_{n1}} \cdot u_{k\%1} = \frac{S_2}{S_{n2}} \cdot u_{k\%2}$$

$$\frac{S_2}{S_1} = \frac{S_{n2}}{S_{n1}} \cdot \frac{u_{k\%1}}{u_{k\%2}} = \frac{10}{10} \cdot \frac{5}{4} = 1,25$$

$$S = S_1 + S_2 = 2,25 S_1 = 20 \text{ MVA}$$

\Rightarrow

$$S_1 = 8,889 \text{ MVA} = 0,89 S_{n1}$$

$$S_2 = 1,25 \cdot 8,889 \text{ MVA} = 11,111 = 1,11 S_{n1}$$

Može se zaključiti da će transformator s manjim naponom kratkog spoja preuzeti veće opterećenje i postati preopterećen, dok će drugi transformator biti podopterećen.

36. Primjer

- a) Nađite ukupnu djelatnu snagu kojom smijemo trajno opteretiti transformatore u paralelnom radu koji su na primaru priključeni na 30 kV napon. Karakteristike transformatora su:

T1: $S_n = 50 \text{ MVA}$; 30/10 kV; $u_{k\%} = 8\%$; Yd5,

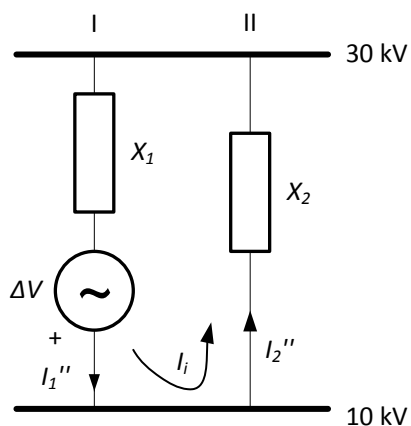
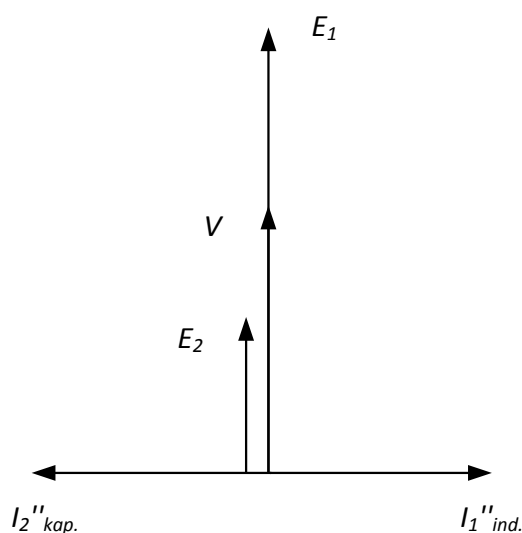
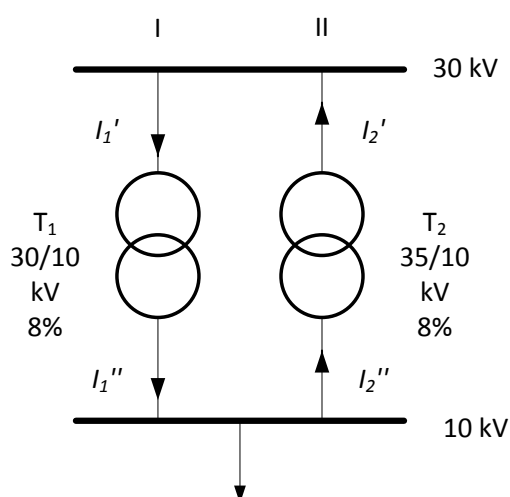
T2: $S_n = 50 \text{ MVA}$; 35/10 kV; $u_{k\%} = 8\%$; Yd5.

Radne otpore transformatora zanemarite!

- b) Kojom su snagom opterećena ova dva transformatora, kada su u praznom hodu priključeni na mrežni napon 30 kV?

Rješenje:

- a) dio zadatka:



$$\Delta V = \frac{30}{\sqrt{3}} \cdot \left(\frac{10}{30} - \frac{10}{35} \right) = 825 \text{ V}$$

$$X_1 = X_2 = \frac{u_{k\%}}{100} \cdot \frac{U_2^2}{S_n} = \frac{8}{100} \cdot \frac{10^2}{50} = 0,16 \Omega = X$$

$$I_i = |I_1''| = |I_2''| = \frac{\Delta V}{X_1 + X_2} = \frac{\Delta V}{2X} = \frac{825}{0,32} = 2,578 \text{ kA}$$

\Rightarrow

$$I_1'' = 2,578 \text{ kA} \text{ induktivno}$$

$$I_2'' = 2,578 \text{ kA} \text{ kapacitivno}$$

$$I_{1n}'' = I_{2n}'' = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_2} = \frac{50}{\sqrt{3} \cdot 10} = 2,887 \text{ kA}$$

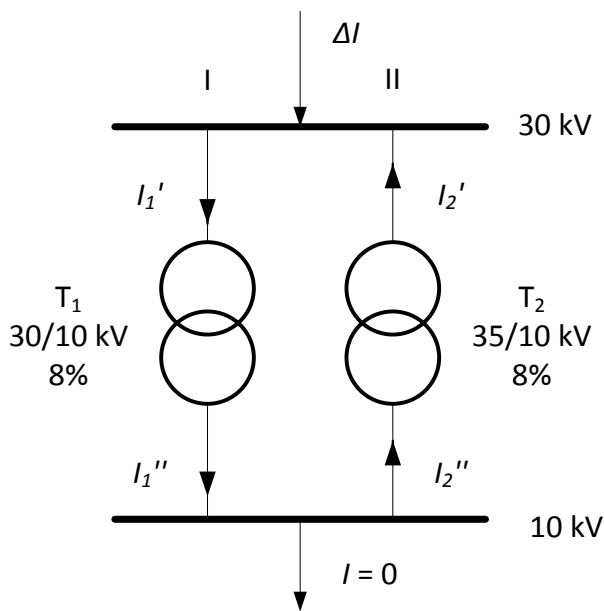
$$I_{1n}'' = \sqrt{I_{1r}''^2 + I_1''^2} \Rightarrow I_{1r}'' = \sqrt{I_{1n}''^2 - I_1''^2} = \sqrt{2,887^2 - 2,578^2} = 1300 \text{ A}$$

$$I_{2n}'' = \sqrt{I_{2r}''^2 + I_2''^2} \Rightarrow I_{2r}'' = \sqrt{I_{2n}''^2 - I_2''^2} = \sqrt{2,887^2 - 2,578^2} = 1300 \text{ A}$$

$$P_1 = P_2 = \sqrt{3} \cdot U_2 \cdot I_{1r}'' = \sqrt{3} \cdot 10 \cdot 1300 = 22,52 \text{ MW}$$

$$P = P_1 + P_2 \cong 45 \text{ MW}$$

b) dio zadatka:



$$|I_1''| = |I_2''| = 2,578 \text{ kA}$$

$$I_1' = I_1'' \cdot \frac{10}{30} = 859 \text{ A}$$

$$I_2' = I_2'' \cdot \frac{10}{35} = 737 \text{ A}$$

$$\Delta I = I_1' - I_2' = 122 \text{ A}$$

$$S = \sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \Delta I = \sqrt{3} \cdot 30 \cdot 122 = 6,34 \text{ MVA}$$

22. Kompenzacija jalove energije

Potrebe za jalovom energijom u EES-u javljaju se iz slijedećih razloga:

a) radi jalovog opterećenja kojeg čine trošila:

- 1) **asinkroni motori** – karakteristično je za sve uređaje koji sadrže magnetske krugove da zahtijevaju određenu jalovu snagu zbog magnetiziranja; toj se jalovoj snazi pridodaje jalova snaga zbog prolaska struje opterećenja kroz induktivitet motora
- 2) **sinkroni motori** – ovisno o veličini uzbude mogu mijenjati i svoju jalovu potrošnju pa tako u slučaju potrebe mogu i davati jalovu snagu u mrežu
- 3) **metalurške indukcione i lučne peći** ($\cos \varphi = 0,5 - 0,7$)
- 4) **fluorescentna rasvjeta**

b) radi jalovog opterećenja uzrokovanog elementima EES-a:

- 1) **transformatori** – jalova snaga se koristi za magnetiziranje jezgre te se troši na rasipnim induktivitetima transformatora, otprilike 10% prividne snage je jalovina. Zakon prema kojemu se mijenja potrošnja jalove snage u transformatoru je:

$$Q_{jtr} = \frac{S_n}{100} \cdot (i_{0\%} + m^2 \cdot u_{k\%})$$

gdje je:

$m = S/S_n$; S - trenutna snaga transformatora; S_n - nazivna snaga transformatora;

$i_{0\%} = I_0/(100 I_n)$ - struja praznog hoda u postocima;

$u_{k\%}$ = napon kratkog spoja u postocima;

- 2) **vodovi i kabele** – vodovi i kabele mogu proizvoditi ili trošiti jalovu snagu. Naime, neopterećeni vod priključen na napon daje mreži jalovu snagu. Sa porastom njegova opterećenja vod sve više troši jalovu energiju pa tako do opterećenja koje odgovara prirodnoj snazi on predaje jalovu snagu u mrežu, a nakon te snage on troši jalovu snagu iz mreže
- 3) **kondenzatori (kondenzatorske baterije)** – proizvođači jalove energije
- 4) **sinkroni kompenzatori** – proizvođači jalove snage, imaju mogućnost kontinuirane regulacije proizvodnje
- 5) **sinkroni generatori** – glavni proizvođači i potrošači jalove snage u EES-u.

Nepovoljno djelovanje tokova jalove snage u mreži

- 1) U mrežama visokog napona za koje je karakteristično da im je X/R velik, protok jalove struje kroz elemente mreže uzrokuje velike padove napona, kao i gubitke djelatne i jalove snage
- 2) Elementi mreže koji su dimenzionirani za neku prividnu snagu, za veće vrijednosti jalove snage koja se njima prenosi moraju ograničiti radnu snagu, što je izuzetno neekonomično

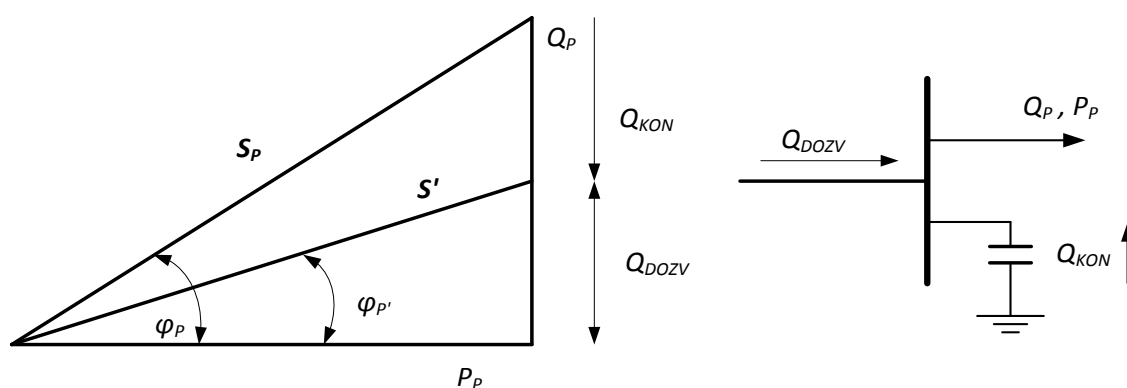
Moguće je dakle uočiti da tokovi jalove snage povećavaju troškove rada EES-a. Zbog toga proizvođač električne energije redovito zahtijeva od potrošača da ograniče uzimanje jalove snage iz sustava. To je ograničenje prema tarifnoj politici proizvođača električne energije ograničeno određenim najmanjim $\cos\varphi = 0,95$. Ukoliko potrošač uzima više jalove snage nego što odgovara propisanom $\cos\varphi$, proizvođač naplaćuje višak isporučene jalove snage/energije prema unaprijed određenoj tarifi. U tu se svrhu na obračunskim mjernim mjestima ugrađuju odgovarajući mjerni uređaji i to ovisno o veličini potrošača – za male se potrošače ne naplaćuje jalova energija, ali za veće da, zbog čega se onda kod njih ugrađuju brojila djelatne i jalove snage ($\cos\varphi$).

Faktor snage potrošača (kompenzacija) se može poboljšati tako da se jalova energija proizvodi na sabirnicama potrošača, čime se automatski smanjuje ono nepovoljno uzimanje jalove energije iz mreže. Jalovu energiju kod potrošača moguće je proizvoditi na više načina – sinkroni motori, kompenzatori, kondenzatorske baterije... ali se najčešće ugrađuju kondenzatorske baterije što se i najčešće podrazumijeva pod pojmom kompenzacije jalove snage.

37. Primjer – Pogon sa stalnim opterećenjem od $P_1 = 2$ MW troši mjesečno $W_j = 1440$ Mvarh jalove energije. Izvršite kompenzaciju jalove energije i odredite iznos Q_{KON} na sabirnicama napajanja tako da se ne plaća jalova energija. Pri tome treba uzeti da mjesec traje 30 dana.

Rješenje:

Prema tarifnoj politici proizvođača električne energije, potrošač ne plaća jalovu energiju, ako mu je $\cos\varphi \leq 0,95$. Prema tome potrebno je ugradnjom kondenzatorske baterije na potrošačke sabirnice, sa Q_{KON} jalovom snagom smanjiti potraživanje potrošača za jalovom energijom iz mreže na vrijednost Q_{DOZV} , čime se ujedno uz stalnu djelatnu snagu (P_P) smanjuje i φ_P na $\varphi_{P'}$ prema mreži.



$$S' = \frac{P_p}{\cos \varphi} = \frac{Q_{DOZV}}{\sin \varphi} \Rightarrow Q_{DOZV} = \tan \varphi \cdot P_p = P_p \cdot \tan(\arccos 0,95) = 0,66 \text{ Mvar}$$

$$Q_p = \frac{W_j}{T} = \frac{1440 \text{ Mvarh}}{30 \cdot 24 \text{ h}} = 2 \text{ Mvar}$$

$$Q_{KON} = Q_p - Q_{DOZV} = 2 - 0,66 = 1,34 \text{ Mvar}.$$

38. Primjer – Dnevni dijagram opterećenja jednog industrijskog pogona dan je slijedećim podacima:

a) slučaj:

0 – 6h :	P = 200 kW;	Q = 300 kvar
6 – 14h :	P = 600 kW;	Q = 500 kvar
14 – 24h :	P = 200 kW;	Q = 300 kvar

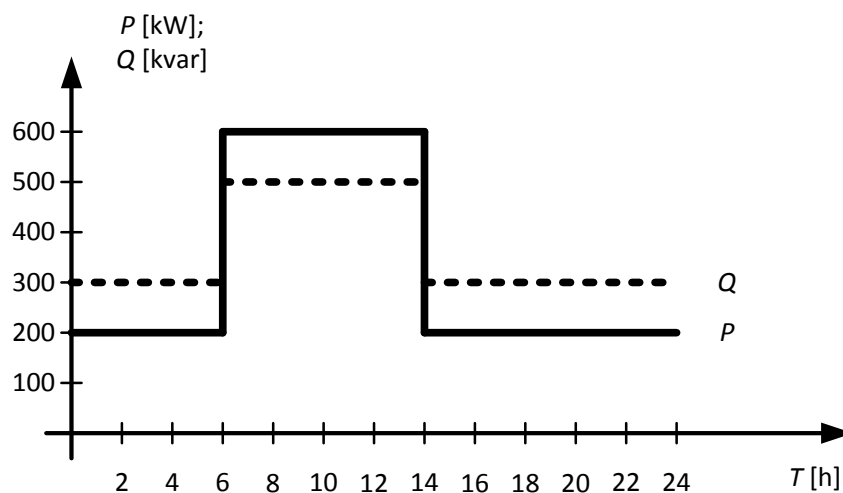
b) slučaj:

0 – 6h :	P = 200 kW;	Q = 200 kvar
6 – 14h :	P = 600 kW;	Q = 600 kvar
14 – 24h :	P = 200 kW;	Q = 200 kvar

Izvršite kompenzaciju jalove energije industrijskog pogona da se ne mora plaćati jalova energija.

Rješenje:

a) slučaj:



Prema dnevnom dijagramu opterećenja potrošnja je:

$$W_R = 200 \cdot (6 - 0) + 600 \cdot (14 - 6) + 200 \cdot (24 - 14) = 8000 \text{ kWh}$$

$$W_j = 300 \cdot (6 - 0) + 500 \cdot (14 - 6) + 300 \cdot (24 - 14) = 8800 \text{ kvarh}$$

Prema tarifnoj politici je za dani dijagram djelatnog opterećenja dozvoljena potrošnja jalove snage u iznosu:

$$W_{jdozv} = W_R \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,95) = 8000 \cdot 0,33 = 2640 \text{ kvarh}$$

Prema tome je potrebno na sabirnice industrijskog postrojenja ugraditi kondenzatorsku bateriju koja će u nekom periodu proizvesti jalovu energiju:

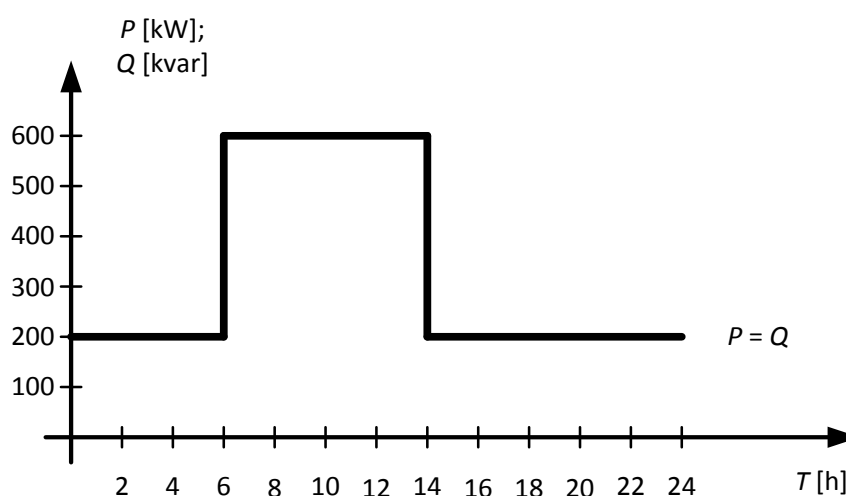
$$W_{jKON} = W_j - W_{jdozv} = 8800 - 2640 = 6160 \text{ kvarh}$$

Naka je za početak riječ o periodu od cijelih 24 sata (za isti W_{jKON} se postiže minimalni Q_{KON}):

$$Q_{KON} = \frac{W_{jKON}}{T} = \frac{6160}{24} = 256,67 \text{ kvar} < Q_{MIN} = 300 \text{ kvar}$$

Budući da je dobivena vrijednost $Q_{KON} < Q_{MIN}$, navedena baterija zadovoljava u smislu da se u niti jednom trenutku unutar 24h neće dogoditi da postrojenje predaje jalovu energiju mreži, što je nepovoljno (ugrađena jednosmjerna brojila kod potrošača se ne mogu vratiti unatrag).

b) slučaj:



$$W_R = 200 \cdot (6 - 0) + 600 \cdot (14 - 6) + 200 \cdot (24 - 14) = 8000 \text{ kWh}$$

$$W_j = 200 \cdot (6 - 0) + 600 \cdot (14 - 6) + 200 \cdot (24 - 14) = 8000 \text{ kvarh}$$

$$W_{jdozv} = W_R \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,95) = 8000 \cdot 0,33 = 2640 \text{ kvarh}$$

$$W_{jKON} = W_j - W_{jdozv} = 8000 - 2640 = 5360 \text{ kvarh}$$

$$Q_{KON} = \frac{W_{jKON}}{T} = \frac{5360}{24} = 223,3 \text{ kvar} > Q_{MIN} = 200 \text{ kvar}$$

Sada promatrana kondenzatorska baterija očito ne zadovoljava pa je potrebno odvojeno promatrati pojedine vremenske intervale. Od 0 – 6h i od 14 – 24h je ukupno proizvedena jalova energija:

$$200 \cdot (6 - 0) + 200 \cdot (24 - 14) = 3200 \text{ kvarh}$$

i to ide iz kondenzatorske baterije kojoj su kapaciteti tako podešeni da daje upravo 200 kvar u oba promatrana perioda.

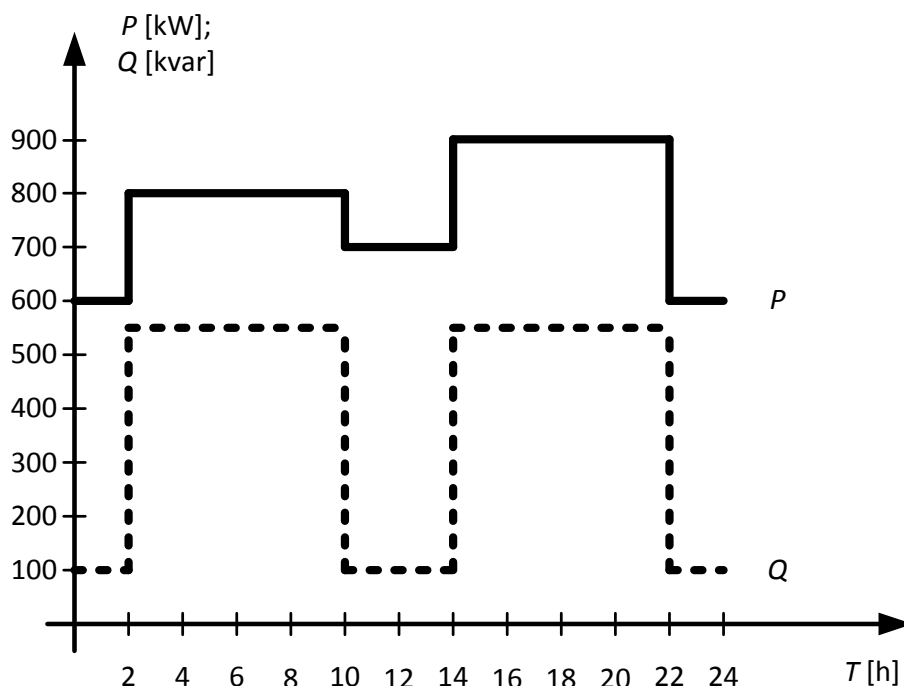
$$\text{Za } T = 14 - 6 = 8 \text{ h:}$$

$$W_{jKON} = (W_j - 3200) - W_{jdozv} = 8000 - 3200 - 2640 = 2160 \text{ kvarh}$$

$$Q_{KON} = \frac{W_{jKON}}{T} = \frac{2160}{8} = 270 \text{ kvar} < 600 \text{ kvar}$$

Dakle unutar perioda 0 – 6h i od 14 – 24h mreža ne predaje jalovu energiju potrošača, nego to čini kondenzatorska baterija. Mreža predaje jalovu energiju potrošaču u periodu 6 – 14h i to u iznosu od 2640 kvarh = W_{jdozv} , dok ostatak jalove energije, 2160 kvarh pokriva kondenzatorska baterija čiji je kapacitet podešen tako da daje potrebnu snagu od 270 kvar.

39. Primjer – Dnevni dijagram opterećenja jednog industrijskog postrojenja prikazan je na slici. Radi zadovoljavanja uvjeta ne plaćanja jalove energije, potrebno je izvršiti kompenzaciju. Odredite potrebnu snagu kondenzatorske baterije.



Rješenje:

$$W_R = 600 \cdot (2 - 0) + 800 \cdot (10 - 2) + 700 \cdot (14 - 10) + 900 \cdot (22 - 14) + 600 \cdot (24 - 22) = 18800 \text{ kWh}$$

$$W_j = 100 \cdot (2 - 0) + 550 \cdot (10 - 2) + 100 \cdot (14 - 10) + 550 \cdot (22 - 14) + 100 \cdot (24 - 22) = 9600 \text{ kvarh}$$

$$W_{j\text{dozv}} = W_R \cdot \text{tg}(\arccos 0,95) = 18800 \cdot 0,33 = 6180 \text{ kvarh}$$

T = 24 h:

$$W_{j\text{KON}} = W_j - W_{j\text{dozv}} = 9600 - 6180 = 3420 \text{ kvarh}$$

$$Q_{\text{KON}} = \frac{W_{j\text{KON}}}{T} = \frac{3420}{24} = 142,5 \text{ kvar} > Q_{\text{min}} = 100 \text{ kvar}$$

T = (10-2)+(22-14) = 16 h:

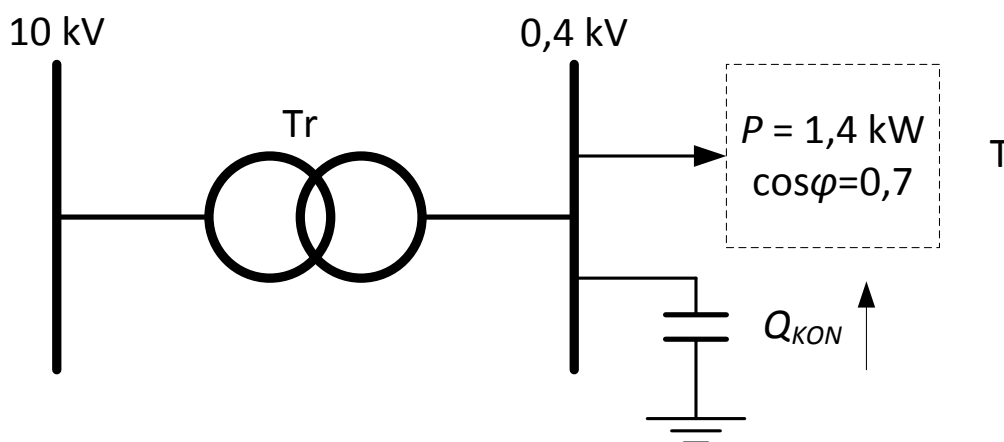
$$W_{j\text{KON}} = W_j - (100 \cdot (2 - 0) + 100 \cdot (14 - 10) + 100 \cdot (24 - 22)) - W_{j\text{dozv}} = 9600 - 800 - 6180 = 2620 \text{ kvarh}$$

$$Q_{\text{KON}} = \frac{W_{j\text{KON}}}{T} = \frac{2620}{16} = 163,75 \text{ kVAr} < 550 \text{ kvar}$$

40. Primjer – Transformator 10/0,4kV, $S_n = 4\text{MVA}$, $i_{0\%} = u_{k\%} = 10\%$ je opterećen snagom $P = 1,4$ MW uz $\cos\varphi = 0,7$. Uz zahtjev $\cos\varphi = 0,95$ na 10 kV strani, odredite potrebnu snagu kompenzacije. U crtajte povoljnije mjesto kompenzacije.

Rješenje:

Povoljnije mjesto ugradnje jest potrošačka sabirnica 0,4 kV, jer se time izbjegava tok Q_{KON} kroz transformator, čime se ne stvaraju dodatni gubici uslijed protoka Q_{KON} preko transformatora, a postiže se isti efekt, s obzirom na 10 kV sabirnice kao u slučaju da je baterija priključena na 10 kV sabirnice. U slučaju ugradnje kondenzatorke baterije na 10 kV sabirnice bila bi potrebna veća Q_{KON} .



$$m = \frac{S_T}{S_n} = \frac{\frac{P}{\cos \varphi}}{S_n} = \frac{\frac{1,4}{0,7}}{4} = 0,5$$

$$Q_{jtr} = \frac{S_n}{100} \cdot (i_{0\%} + m^2 \cdot u_{k\%}) = \frac{4}{100} \cdot (10 + 0,5^2 \cdot 10) = 0,5 \text{ Mvar}$$

$$Q_T = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,7) = 1,43 \text{ Mvar}$$

$$Q_{uk} = Q_{jtr} + Q_T = 1,93 \text{ Mvar}$$

$$Q_{DOZV} = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,95) = 0,33 \cdot P = 0,462 \text{ Mvar}$$

$$Q_{KON} = Q_{uk} - Q_{DOZV} = 1,93 - 0,462 = 1,468 \text{ Mvar}$$

To je Q_{KON} u prvoj iteraciji! Realno bi sada trebalo provesti cijeli postupak iznova uvažavajući da je:

$$S_T = \sqrt{P^2 + (Q_T - Q_{KON})^2}$$

$$\Rightarrow m$$

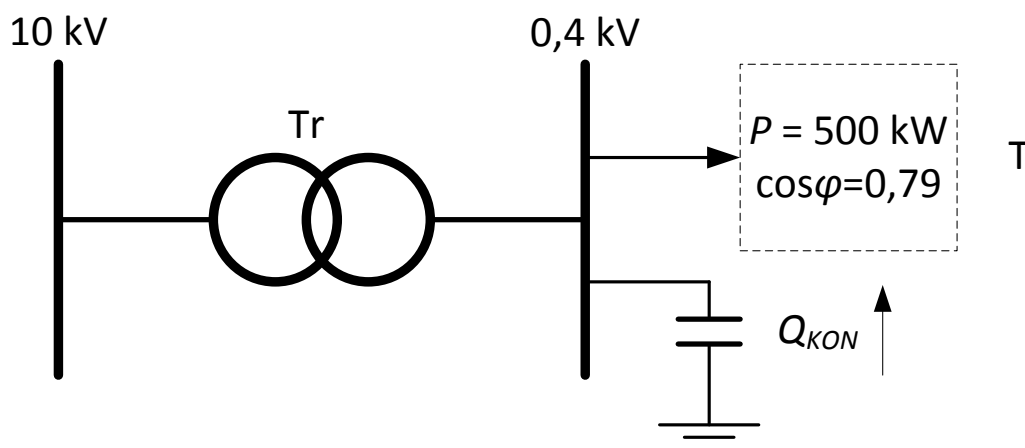
$$\Rightarrow Q_{jtr}$$

$$\Rightarrow Q_{uk} = Q_{jtr} + Q_T$$

$$\Rightarrow \text{novi } Q_{KON} = Q_{uk} - Q_{DOZV}$$

Iterativni postupak potrebno je provoditi sve dok se ne postigne zadovoljavajuće mala razlika Q_{KON} u 2 susjedne iteracije.

41. Primjer – Na sabirnicama transformatora 10/0,4kV, $S_n = 630 \text{ kVA}$, $i_{0\%} = 2\%$, $u_{k\%} = 6\%$ je priključen teret $P = 500 \text{ kW}$ uz $\cos \varphi = 0,79$. Zbog potrebe da se jalova energija ne plaća, izvršena je kompenzacija $\cos \varphi = 0,95$. Obračunsko mjesto je na sabirnicama 10 kV. Zbog porasta opterećenja ukazala se potreba priključka novog tereta u iznosu 60 kW uz $\cos \varphi = 0,79$. Koliko će biti opterećen transformator?



Rješenje:

$$m = \frac{S_T}{S_n} = \frac{\frac{P}{\cos \varphi}}{S_n} = \frac{\frac{500}{0,79}}{630} = 1$$

$$Q_{jtr} = \frac{S_n}{100} \cdot (i_{0\%} + m^2 \cdot u_{k\%}) = \frac{630}{100} \cdot (2 + 1^2 \cdot 6) = 50,4 \text{ kvar}$$

$$Q_T = P \cdot \operatorname{tg} \varphi = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,79) = 388 \text{ kvar}$$

$$Q_{uk} = Q_{jtr} + Q_T = 438,4 \text{ kvar}$$

$$Q_{DOZV} = P \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,95) = 0,33 \cdot 500 = 164,34 \text{ kvar}$$

$$Q_{KON} = Q_{uk} - Q_{DOZV} = 438,4 - 164,34 = 274,06 \text{ kvar}$$

Nakon porasta tereta:

$$P_{tr} = 500 + 60 = 560 \text{ kW}$$

$$Q_{jtr} = Q_{DOZV} + 60 \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,79) = 164,34 + 46,56 = 210,9 \text{ kvar}$$

$$S_{tr} = \sqrt{P^2 + Q_{jtr}^2} = \sqrt{560^2 + 210,9^2} = 598,4 \text{ kVA}$$

42. Primjer – Jedno tvorničko postrojenje troši godišnje $3 \cdot 10^6$ kWh i $3 \cdot 10^6$ kvarh električne energije. Postrojenje godišnje radi 5000 sati. Izračunajte godišnju uštedu, ako je cijena jalove energije 60 kn/kvarh, a cijena uređaja za kompenzaciju 10.500.000 kn/100kvarh, uz godišnje troškove za uređaj od 20% cijene uređaja.

Rješenje:

$$W_{jdozv} = W_R \cdot \operatorname{tg}(\arccos 0,95) = 3 \cdot 10^6 \cdot 0,33 = 10^6 \text{ kvarh}$$

$$W_{jKON} = W_j - W_{jdozv} = 3 \cdot 10^6 - 10^6 = 2 \cdot 10^6 \text{ kvarh}$$

$$Q_{KON} = \frac{W_{jKON}}{T} = \frac{2 \cdot 10^6}{5 \cdot 10^3} = 400 \text{ kvar}$$

Godišnja ušteda zbog ne plaćanja jalove energije, T_{wj} :

$$T_{wj} = W_{jKON} \cdot C_{wj} = 2 \cdot 10^6 \cdot 60 = 120 \cdot 10^6 \text{ NJ (Novčanih Jedinica)}$$

Godišnji troškovi zbog investiranja u kondenzatorsku bateriju, T_i :

$$T_i = 0,2 \cdot Q_{KON} \cdot C_{KON} = 0,2 \cdot 400 \cdot \frac{10.500.000}{100} = 8,4 \cdot 10^6 \text{ NJ}$$

Godišnja ušteda je tako (bez uračunatog troška kupovine baterije) jednaka:

$$T_{wj} - T_i = (120 - 8,4) \cdot 10^6 \text{ NJ} = 111,6 \cdot 10^6 \text{ NJ} = 111,6 \cdot 10^6 \text{ kn}.$$